

กลยุทธ์การตัดค่ายอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุ
ไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**PEAK-CUTTING STRATEGY FOR REGENERATIVE
ENERGY MANAGEMENT INCORPORATING EDLC
IN MASS RAPID TRANSIT**




Chaiyut Sumpavakup

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2017**

กลยุทธ์การตัดค่ายอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า
สองชั้นในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



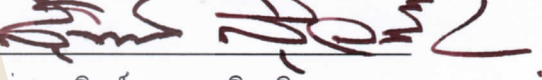
(รศ. ดร.ภูมินทร์ กิระวานิช)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ชนัดชัย กุลวรรานิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



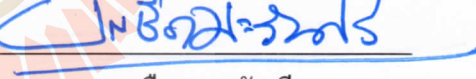
(นายสุจินต์ สุวรรณกิจบริหาร)

กรรมการ



(รศ. ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



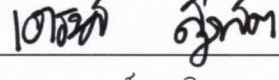
(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ




(ผศ. ดร.เพด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ



(อ. ดร.เอกรงค์ สุขจิต)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ : กลยุทธ์การตัดค่ายอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (PEAK-CUTTING STRATEGY FOR REGENERATIVE ENERGY MANAGEMENT INCORPORATING EDLC IN MASS RAPID TRANSIT) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์,
217 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอกลยุทธ์ใหม่สำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถในรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน โดยพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนที่ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นบนขบวนรถและพัฒนากลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด ซึ่งเป็นกลยุทธ์แนวทางใหม่สำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น ภายใต้เงื่อนไขการลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟในช่วงเร่งและการใช้พลังงานโดยรวมน้อยที่สุด ด้วยโปรแกรม MATLAB นำมาทดสอบและประเมินผลกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนในประเทศไทย ได้แก่ รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบกับ 3 กลยุทธ์จากงานวิจัยก่อนหน้า คือ กลยุทธ์ควบคุมการตัดค่ายอดของกำลังไฟฟ้า กลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน และกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ จากผลการเปรียบเทียบพบว่า กลยุทธ์ที่นำเสนอ ให้ผลการลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟในช่วงเร่งและการใช้พลังงานโดยรวมดีกว่ากลยุทธ์อื่นที่นำเสนอ รวมทั้งนำเสนอการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนร่วมกับ OBESS โดยใช้กลยุทธ์ที่นำเสนอร่วมกับวิธีการควบคุมเวลาการเดินรถ 3 วิธี ได้แก่ การควบคุมการหน่วง การควบคุมจุดเริ่มโหมดการแล่น และการควบคุมการหน่วงร่วมกับการควบคุมจุดเริ่มโหมดการแล่น ด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม จากผลการทดสอบพบว่ากลยุทธ์ที่นำเสนอร่วมกับการควบคุมการหน่วงร่วมกับการควบคุมจุดเริ่มโหมดการแล่น สามารถช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ถึง 15.56% และลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ถึง 63.49% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้ง OBESS อีกทั้งยังใช้จำนวนมอดูลติดตั้งน้อยกว่ากรณีอื่นที่นำเสนอ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งที่สถานีสุดท้ายโดยใช้การเดินรถแบบไร้ตัวนำสัมผัสเป็นกรณีศึกษาอีกด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

CHAIYUT SUMPAAKUP : PEAK-CUTTING STRATEGY FOR
REGENERATIVE ENERGY MANAGEMENT INCORPORATING EDLC
IN MASS RAPID TRANSIT. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 217 PP.

DC ELECTRIC RAILWAY/REGENERATIVE ENERGY MANAGEMENT/ON-
BOARD ENERGY STORAGE SYSTEM/PEAK DEMAND REDUCTION

This thesis presents a new strategy for regenerative energy management incorporating on-board energy storage system (OBESS) in DC mass rapid transit. Using MATLAB, a DC mass transit system with on-board electric double layer capacitor (EDLC) is developed. A peak demand cutting strategy uses regenerative energy stored in the OBESS to minimize train peak power during acceleration and overall energy consumption. The Bangkok Mass Transit System (BTS)-Silom Line in Thailand is used to test and verify the proposed strategy in comparison with three strategies from previous research: 1) peak shaving control strategy, 2) proportional control strategy, and 3) SOC control strategy. The results show that the proposed strategy is more effective than the other strategies. With peak demand cutting strategy, the thesis also presents a study on the optimal energy saving in a DC mass transit system with OBESS by using Genetic Algorithm (GA) under the three methods of different trip time controls: 1) deceleration control, 2) coasting point control, and 3) deceleration and coasting point control. The proposed strategy under the deceleration and coasting point control gives the best results. Compared to a case without OBESS, 15.56% energy saving is achieved by the proposed strategy, peak power is reduced by 63.49% and the number of OBESS modules can also be reduced by controlling the

trip time of the coasting motion together with the deceleration control. Additionally, a catenary-free operation of the BTS for changing the track at the last station is introduced as a case study.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลรวรานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คุณสุจินต์ สุวรรณกิจบริหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอบคุณ โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดหลักสูตรระดับปริญญาเอก

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ชัยยุทธ สัมภาวะกุลปต์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขีดตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชมนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ปรัชมนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.1 การประยุกต์ใช้ OBESS สำหรับการประหยัดพลังงานในระบบบรอดไฟฟ้า.....	6
2.2.2 เทคนิคการควบคุมการจัดการพลังงานคืนกลับ.....	9
2.3 สรุป.....	11
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
3.1 บทนำ.....	12
3.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบบรอดไฟฟ้า.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับกระแสตรง.....	13
3.2.2 ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับกระแสสลับ.....	16
3.2.3 โครงสร้างของขบวนรถไฟฟ้า.....	18
3.2.4 ระบบควบคุมขบวนรถอัตโนมัติ.....	19
3.2.5 หัวรถจักรไฟฟ้าและมอเตอร์ลากจูง.....	20
3.3 ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนในประเทศไทย.....	22
3.4 พลังงานคืนกลับจากการเบรก.....	28
3.4.1 การจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรกด้วยระบบเก็บสะสมพลังงาน.....	29
3.5 ระบบเก็บสะสมพลังงาน.....	30
3.5.1 เทคโนโลยีของ ESSs สำหรับรถไฟฟ้า.....	31
3.5.2 ระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ.....	34
3.5.3 ระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่ง.....	37
3.6 การจัดการพลังงานในระบบรถไฟฟ้า.....	38
3.7 สรุป.....	39
4 แบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน.....	40
4.1 บทนำ.....	40
4.2 แบบจำลองและลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....	40
4.2.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....	44
4.2.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่.....	48
4.2.3 การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่.....	48
4.3 แบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	50
4.4 โปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน.....	54
4.5 การทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	56
4.5.1 ระบบทดสอบ.....	56
4.5.2 ข้อมูลที่ได้จากการวัด.....	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.3 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	62
4.6 สรุป.....	65
5 การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ.....	66
5.1 บทนำ.....	66
5.2 กลยุทธ์การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS.....	66
5.2.1 กลยุทธ์ควบคุมการตัดจ่ายของกำลังไฟฟ้า.....	68
5.2.2 กลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน.....	68
5.2.3 กลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ.....	68
5.3 กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าจ่ายอด.....	70
5.3.1 แบบจำลองการควบคุมการอัดประจุ.....	72
5.3.2 แบบจำลองการควบคุมการคายประจุ.....	74
5.4 การทดสอบและผลการทดสอบกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าจ่ายอด.....	76
5.5 สรุป.....	84
6 การประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน.....	85
6.1 บทนำ.....	85
6.2 การกำหนดปัญหาการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุด.....	85
6.2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	85
6.2.2 ตัวแปรควบคุม.....	85
6.2.3 เงื่อนไขบังคับ.....	86
6.3 ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม.....	87
6.4 ระบบทดสอบ.....	88
6.5 การทดสอบ.....	90
6.6 ผลทดสอบ.....	91
6.6.1 ผลการทดสอบกรณีฐาน (ไม่ได้ติดตั้ง OBESS).....	92
6.6.2 ผลการทดสอบกรณีที่ 1.....	99

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.6.3 ผลการทดสอบกรณีที่ 2.....	105
6.6.4 ผลการทดสอบกรณีที่ 3.....	111
6.6.5 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ.....	118
6.7 กรณีศึกษาการเดินทางเปลี่ยนทางวิ่งโดยใช้การเดินทางแบบไร้ตัวนำสัมผัส.....	127
6.8 สรุป.....	131
7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	132
7.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	132
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	133
รายการอ้างอิง.....	134
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบกลยุทธ์การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดแต่ละวิธี.....	141
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	178
ประวัติผู้เขียน.....	217

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน.....34
3.2	การประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ.....35
3.3	การประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่ง.....36
4.1	รายละเอียดเส้นทางเดินรถของรถไฟฟ้า BTS สายสีลม.....57
4.2	พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า BTS.....57
4.3	รัศมีความโค้งของรถไฟฟ้า BTS สายสีลม.....59
4.4	ข้อมูลจำเพาะของ SKYLAB GPS module รุ่น SKM55.....61
4.5	ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง.....65
5.1	เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผล.....76
5.2	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของกลยุทธ์การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดแต่ละกลยุทธ์.....79
6.1	เงื่อนไขการจำลองผลแต่ละกรณี.....91
6.2	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี GA.....91
6.3	ผลการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม.....92
6.4	ผลการเปรียบเทียบดัชนีสมรรถนะของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณี.....124
6.5	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ TSS ของการทดสอบแต่ละกรณี.....125
6.6	ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ TSS ของการทดสอบแต่ละกรณี.....125
6.7	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของ การทดสอบแต่ละกรณี.....126
6.8	ผลการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งโดยใช้การเดินรถแบบไว้ตัวนำสัมผัส ขาขึ้น (up-track).....128
6.9	ผลการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งโดยใช้การเดินรถแบบไว้ตัวนำสัมผัส ขาล่อง (down-track).....128
ก.1	ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมการตัดค่ายอดของกำลังไฟฟ้า.....142
ก.2	ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน.....152
ก.3	ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ.....162
ก.4	ผลการทดสอบของกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด.....172

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟแบบรางที่สาม.....13
3.2	แรงดันมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 60850.....14
3.3	โครงสร้างการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....15
3.4	วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ สำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงตามมาตรฐาน IEC 60146.....16
3.5	รถไฟฟ้าแบบใช้ระบบจ่ายไฟฟ้า 25 kVac แบบใช้สายส่งเหนือศีรษะที่ประเทศเยอรมัน.....17
3.6	แผนโทกราฟและสายเคทีนารี.....17
3.7	โครงสร้างการจักระบบลากจูงแบบ Locomotive และ EMU.....18
3.8	ตัวอย่างหัวรถจักรไฟฟ้าแบบ Locomotive และ EMU.....19
3.9	ระบบควบคุมขบวนรถอัตโนมัติ.....20
3.10	ลักษณะตัวขบวนรถไฟฟ้าของ MRT.....23
3.11	ตัวอย่างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน ส่วนต่อขยายช่วงบางซื่อ-ท่าพระ และ หัวลำโพง-หลักสอง.....24
3.12	ลักษณะตัวขบวนรถไฟฟ้าของ BTS.....25
3.13	ตัวอย่างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ส่วนต่อขยาย.....27
3.14	ประเภทของระบบเบรกของรถไฟฟ้า.....28
3.15	ภาพรวมการจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรก.....30
3.16	ตัวอย่างการนำแบตเตอรี่ Li-ion ติดตั้งที่สถานี Hiraizumi เพื่อเก็บสะสมพลังงาน.....31
3.17	ตัวอย่างสื่อช่วยแรงสำหรับใช้งานกับรถไฟฟ้า.....32
3.18	ตัวอย่างการนำ EDLC ไปใช้ในรถรางไฟฟ้า (Light Rail Vehicle: LRV).....33
3.19	แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของรถไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ.....36
3.20	ระบบการจัดการพลังงานในรถไฟฟ้า.....39
4.1	แผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....41
4.2	ลักษณะสมบัติของแรงคูดของหัวรถจักร.....42
4.3	การพิจารณาขบวนรถไฟฟ้าแบบ Homogeneous strip.....43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 โหมมคการทำงานของรถไฟฟ้า.....	45
4.5 แผนภาพการคำนวณระยะวิกฤตการเบรก.....	46
4.6 การควบคุมการทำงานของโหมมคการเบรก.....	46
4.7 การสร้างเส้น โครงร่างความเร็ว.....	47
4.8 การควบคุมความเร็วแบบสัดส่วนสำหรับการควบคุมความเร็วรถไฟฟ้า.....	47
4.9 สรุปขั้นตอนการคำนวณลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....	49
4.10 ตัวอย่างแผนภาพจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน.....	50
4.11 วงจรสมมุติระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน.....	51
4.12 ขั้นตอนการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแส.....	54
4.13 โครงสร้าง โปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงหนึ่งขบวน.....	55
4.14 ระบบรถไฟฟ้า BTS SkyTrain สายสีลม.....	56
4.15 คุณลักษณะแรงดูดลากและแรงเบรกของหัวรถจักรไฟฟ้า BTS.....	58
4.16 ระดับเกรเดียนต์ของรถไฟฟ้า BTS สายสีลม.....	58
4.17 การหารัศมีความโค้งของทางวิ่งด้วยวิธีอย่างง่าย.....	60
4.18 อุปกรณ์ GPS module ที่ใช้วัดค่าโครงร่างความเร็วและหน้าตาโปรแกรม VisualGPS.....	61
4.19 ข้อมูล โครงร่างความเร็วที่ได้จากการวัด.....	62
4.20 เปรียบเทียบโครงร่างความเร็วที่ได้จากการวัดกับแบบจำลองที่พัฒนา.....	63
4.21 เปรียบเทียบค่าความเร่งที่คำนวณได้จากค่าวัดกับแบบจำลองที่พัฒนา.....	63
4.22 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จากค่าวัดกับแบบจำลองที่พัฒนา.....	64
4.23 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสะสมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จากค่าวัดกับแบบจำลองที่พัฒนา.....	64
5.1 แผนภาพระบบจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS.....	67
5.2 แผนภาพกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ.....	69
5.3 MITRAC Energy Saver ของบริษัท Bombardier Transportation.....	69
5.4 แผนภาพการจัดการพลังงานคืนกลับด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด.....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อจัดการพลังงานคืนกลับด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด.....	71
5.6 แผนภาพเปรียบเทียบการจัดการพลังงานกรณีไม่ได้ติดตั้งและติดตั้ง OBESS.....	72
5.7 ขั้นตอนการควบคุมการอัดประจุของ OBESS.....	73
5.8 เงื่อนไขการหาจุดเริ่มต้น P_{start} ของแบบจำลองการควบคุมการคายประจุของ OBESS.....	75
5.9 ขั้นตอนการควบคุมการคายประจุของ OBESS.....	75
5.10 การควบคุมความเร็วตามโครงร่างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้.....	77
5.11 ผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน.....	78
5.12 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้า.....	78
5.13 ผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า.....	80
5.14 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน.....	80
5.15 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำสุด.....	81
5.16 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุด.....	81
5.17 ผลการเปรียบเทียบแรงดันรางสูงสุด.....	82
5.18 ผลการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าวัดไหลสูงสุด.....	82
5.19 ผลการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก.....	83
5.20 ผลการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวม.....	83
6.1 ลักษณะ โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าผ่านการควบคุม trip time แต่ละวิธี.....	86
6.2 วัฏจักรของ GA.....	88
6.3 ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของ GA กับการเชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรมหลัก.....	89
6.4 การทำงานของโปรแกรมหลักเพื่อการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด.....	89
6.5 เส้นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้า BTS สายสีลม กรณีฐาน.....	90
6.6 เส้นโค้งเวลา-ระยะทาง กรณีฐาน.....	93
6.7 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ กรณีฐาน.....	93
6.8 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า กรณีฐาน.....	94
6.9 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก กรณีฐาน.....	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีฐาน.....95
6.11	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีฐาน.....96
6.12	กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวม กรณีฐาน.....97
6.13	แรงดันไฟฟ้าที่ราง กรณีฐาน.....97
6.14	กระแสไฟฟ้าวัดไหล กรณีฐาน.....98
6.15	โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 1.....99
6.16	กำลังไฟฟ้าของ OBESS และ %SOC ของการทดสอบกรณีที่ 1.....99
6.17	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของการทดสอบกรณีที่ 1.....100
6.18	แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าของการทดสอบกรณีที่ 1.....100
6.19	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 1.....101
6.20	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 1.....102
6.21	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของการทดสอบกรณีที่ 1.....103
6.22	กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของการทดสอบกรณีที่ 1.....103
6.23	แรงดันไฟฟ้าที่รางของการทดสอบกรณีที่ 1.....104
6.24	กระแสไฟฟ้าวัดไหลของการทดสอบกรณีที่ 1.....104
6.25	โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 2.....105
6.26	กำลังไฟฟ้าของ OBESS และ %SOC ของการทดสอบกรณีที่ 2.....105
6.27	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของการทดสอบกรณีที่ 2.....106
6.28	แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าของการทดสอบกรณีที่ 2.....106
6.29	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 2.....107
6.30	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 2.....108
6.31	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของการทดสอบกรณีที่ 2.....109
6.32	กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของการทดสอบกรณีที่ 2.....109
6.33	แรงดันไฟฟ้าที่รางของการทดสอบกรณีที่ 2.....110
6.34	กระแสไฟฟ้าวัดไหลของการทดสอบกรณีที่ 2.....110
6.35	โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 3.....111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.36	กำลังไฟฟ้าของ OBESS และ %SOC ของการทดสอบกรณีที่ 3..... 111
6.37	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของการทดสอบกรณีที่ 3..... 112
6.38	แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าของการทดสอบกรณีที่ 3..... 112
6.39	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 3..... 113
6.40	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 3..... 114
6.41	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของการทดสอบกรณีที่ 3..... 115
6.42	กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของการทดสอบกรณีที่ 3..... 115
6.43	แรงดันไฟฟ้าที่รางของการทดสอบกรณีที่ 3..... 116
6.44	กระแสไฟฟ้ารั่วไหลของการทดสอบกรณีที่ 3..... 116
6.45	โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบแต่ละกรณี..... 118
6.46	ตัวอย่างโครงร่างความเร็วของรถไฟระหว่างสถานี S6-S7 ของการทดสอบแต่ละกรณี..... 118
6.47	กำลังไฟฟ้าของ OBESS และ %SOC ของการทดสอบแต่ละกรณี..... 119
6.48	กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของการทดสอบแต่ละกรณี..... 119
6.49	แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณี..... 120
6.50	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของการทดสอบแต่ละกรณี..... 120
6.51	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบแต่ละกรณี..... 121
6.52	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบแต่ละกรณี..... 122
6.53	กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของการทดสอบแต่ละกรณี..... 123
6.54	แรงดันไฟฟ้าที่รางของการทดสอบแต่ละกรณี..... 123
6.55	กระแสไฟฟ้ารั่วไหลของการทดสอบแต่ละกรณี..... 124
6.56	เส้นทางการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งที่สถานีผู้โดยสาร S12 (บางหว้า)..... 127
6.57	โครงร่างความเร็ว %SOC กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและ OBESS เทียบกับระยะทาง (ขาขึ้น)..... 129
6.58	โครงร่างความเร็ว %SOC กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและ OBESS เทียบกับระยะทาง (ขาล่อง)..... 130
6.59	โครงร่างความเร็ว %SOC กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและ OBESS เทียบกับเวลา (ขาขึ้น)..... 130

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.60	131
ก.1	147
ก.2	147
ก.3	148
ก.4	148
ก.5	149
ก.6	149
ก.7	150
ก.8	150
ก.9	151
ก.10	151
ก.11	157
ก.12	157
ก.13	158
ก.14	158
ก.15	159
ก.16	159
ก.17	160
ก.18	160
ก.19	161
ก.20	161
ก.21	167
ก.22	167
ก.23	168
ก.24	168
ก.25	169

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.26	ผลของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3.....	169
ก.27	ผลของแรงดันรางสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3.....	170
ก.28	ผลของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3.....	170
ก.29	ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3.....	171
ก.30	ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3.....	171
ก.31	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	173
ก.32	ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	173
ก.33	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	174
ก.34	ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	174
ก.35	ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	175
ก.36	ผลของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	175
ก.37	ผลของแรงดันรางสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	176
ก.38	ผลของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	176
ก.39	ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	177
ก.40	ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4.....	177



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน การขนส่งสาธารณะมีความต้องการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งทวีปเอเชีย หลายประเทศมีการวางแผนขยายเส้นทางของระบบขนส่งมวลชนของตนเองให้ครอบคลุมพื้นที่เขตเมืองทั้งหมด (Kulworawanichpong, 2015) เช่น ประเทศไทย ประเทศสิงคโปร์ ประเทศมาเลเซีย ประเทศอินเดีย เป็นต้น เพื่อที่จะเคลื่อนย้ายผู้โดยสารจำนวนมากในช่วงเวลาเร่งด่วนต้องมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เพียงพอต่อความต้องการ ในทศวรรษที่ผ่านมา การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นประเด็นสำคัญของตลาดพลังงานโลกสมัยใหม่ (Barrero, Mierlo, and Tackoen, 2008) ซึ่งไม่ได้เป็นผลโดยตรงมาจากการใช้พลังงานจากภาคอุตสาหกรรมเท่านั้น ยังรวมไปถึงระบบรถไฟฟ้าอีกด้วย ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการจัดการเป็นเรื่องท้าทายที่ยิ่งใหญ่ในเร็ว ๆ นี้โดยไม่ต้องสงสัย (Khayyam et al., 2015) ในระบบรถไฟฟ้า การประหยัดพลังงานจะมีบทบาทสำคัญเสมอในระบบย่อยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อน การจัดการจราจรและหน่วยงานควบคุมการเดินรถ ผู้ควบคุมระบบพยายามหาทางในการจัดการการใช้พลังงานในระบบอย่างมีประสิทธิภาพแต่มีหลายเงื่อนไขและปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง ด้วยเหตุผลนี้เองระบบการจัดการพลังงานของรถไฟฟ้า (Railway Energy Management System: REMS) จึงถูกพัฒนาโดยมีเป้าหมายประสานระบบการทำงานและควบคุมการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม หลักการทำงานของ REMS คือ วางแผนการใช้พลังงานและควบคุมการทำงานให้เป็นไปตามแผน นอกจากนี้ยังคำนึงถึงการใช้พลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่ (regenerative energy) อย่างมีประสิทธิภาพ (Miyoshi, Takeba, and Miyatake, 2012)

การเบรกคืนพลังงานกลับ (regenerative braking) เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (Sheu, and Lin, 2012) สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 8-25% ของพลังงานที่ใช้ในรถไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับรอบการขับและกลยุทธ์การควบคุม (Xu et al., 2011) โดยทั่วไปประโยชน์หลักของการใช้อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานงานในรถไฟฟ้า คือ การนำพลังงานที่ได้จากการเบรกมาใช้ใหม่ (Sheu, and Lin, 2012; Wang et al., 2014) ลักษณะระบบขนส่งทางรางในเมืองจะมีการเร่งความเร็วและเบรกบ่อยซึ่งนำไปสู่กำลังไฟฟ้าคืนกลับที่สูง พลังงานที่ได้จากการเบรกสามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ระบบเก็บสะสม

พลังงานริมทาง (Trackside Energy Storage System: TESS) หรือระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ (Onboard Energy Storage System: OBESS) ทั้งสองประเภทมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือกใช้จึงต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์และค่าใช้จ่ายในการลงทุนเป็นสำคัญ OBESS สามารถเก็บพลังงานคืนกลับถ้าสายส่งรับไม่ได้ และปล่อยพลังงานเมื่อรถไฟเร่งความเร็วหรือในเงื่อนไขที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันพิกัดกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของ OBESS ไม่เพียงพอเนื่องจากความหนาแน่นทางกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานต่ำและข้อจำกัดของพื้นที่และน้ำหนักบนรถไฟ โดยปกติแล้วจะถูกติดตั้งบนหลังคาตู้รถไฟ (Gee, and Dunn, 2015) Gonzalez-Gil et al. (2014) ได้อธิบายว่า OBESS มีประสิทธิภาพสูงกว่าและการจัดการพลังงานง่ายกว่าเนื่องจากไม่มีผลของการสูญเสียของสายส่งและความเป็นอิสระจากเงื่อนไขการเดินรถ เมื่อเปรียบเทียบกับ TESS โดยทั่วไปวัตถุประสงค์ของการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS คือ ลดการใช้พลังงาน (Dominguez et al., 2012; Miyatake, and Ko, 2010) เพิ่มการใช้ประโยชน์จากพลังงานคืนกลับ (Shen et al., 2013) ลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีไฟฟ้า (Battistelli, L. et al., 2009) และรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (Jung et al., 2014; Iannuzzi, and Tricoli, 2010) วิทยานิพนธ์นี้มีแรงจูงใจจากปัญหาของการลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction substation) ในระบบรถไฟฟ้ายกระดับ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่รถไฟเร่งเป็นหลัก ประมาณ 25% ของค่าไฟฟ้าโดยรวม (Battistelli et al., 2009) ในประเทศไทยค่าไฟฟ้าฐาน (basic tariff) ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ 1) ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (demand charge; บาท/kW) 2) ค่าพลังงานไฟฟ้า (energy charge; บาท/kWh) 3) ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (power factor charge; บาท/kVar) 4) ค่าบริการ (service charge; บาท/เดือน) ค่าความต้องการไฟฟ้าจะคิดจากความต้องการพลังงานไฟฟ้า (kW) เฉลี่ยใน 15 นาที ที่สูงสุดของช่วงเวลาในแต่ละเดือน ตามประเภทของอัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ ถ้าเราสามารถลดค่ายอดของกำลังไฟฟ้าได้ ค่าไฟฟ้าโดยรวมก็จะลดลงเช่นกัน

การประยุกต์ใช้งาน OBESS ในระบบรถไฟฟ้ายกระดับให้สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์การใช้งานได้นั้น ย่อมต้องอาศัยกลยุทธ์ในการควบคุมระบบเก็บสะสมพลังงานที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ กลยุทธ์การจัดการพลังงานร่วมกับ ESS มีหลากหลายและถูกนำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่ละงานมีความอยากง่ายแตกต่างกัน เช่น กลยุทธ์การเขียนกฎ (Rule Based Strategies: RBS) จะเป็นกลยุทธ์ที่ง่ายที่สุดและการกำหนดกฎมักจะขึ้นอยู่กับโหมดการเร่ง โหมดเบรกคืนพลังงานกลับ (regenerative braking) (Battistelli et al., 2009; Takagi, and Amano, 2014) โครงร่างความเร็วหรือกำลังไฟฟ้าของรถไฟที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Grigans, and Latkovskis, 2010) กลยุทธ์ที่อยู่บนพื้นฐานการควบคุมแบบสัดส่วนโดยใช้สถานะการประจุ ป้อนกลับ (State of Charge: SOC) (Zhao et al., 2010) กลยุทธ์ควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานพีชชีลอจิก (fuzzy logic) (Talla et al., 2015) หรือ

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) (Moreno, Ortuzar, and Dixon, 2006) เป็นต้น วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนากลยุทธ์การควบคุมสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electric Double Layer Capacitor: EDLC) ในรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน เพื่อลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน

1.2.2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนที่ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นบนขบวนรถ

1.2.3 เพื่อศึกษาการจัดการพลังงานคืนกลับที่ได้จากการเบรกร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน

1.2.4 เพื่อพัฒนากลยุทธ์ใหม่สำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้แรงเพื่อออกตัวจากสถานีผู้โดยสารมีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ไม่พิจารณาผลในสภาวะชั่วคราวจากการสับวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

1.4.2 ไม่คิดผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าและการรบกวนทางไฟฟ้าอื่นๆ

1.4.3 พิจารณาน้ำหนักของผู้โดยสารคงที่ (payload AW3) เท่านั้น

1.4.4 ไม่คำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์

1.4.5 พิจารณาข้อจำกัดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นด้านพิกัดกำลังไฟฟ้าและพิกัดพลังงานไฟฟ้าติดตั้งเท่านั้น

1.4.6 พิจารณาแบบจำลองของ OBESS ในรูปแบบการจัดการการไหลของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น

1.4.7 พิจารณาจำลองผลระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน 1 ขบวนเท่านั้น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 พัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนที่ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นบนขบวนรถ

1.5.2 พัฒนากลยุทธ์ใหม่สำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน ภายใต้เงื่อนไขการลดกำลังไฟฟ้าจ่ายออกของรถไฟฟ้าในช่วงเร่งและการใช้พลังงานโดยรวมน้อยที่สุด

1.5.3 ทดสอบและประเมินผลกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนในประเทศไทย ได้แก่ รถไฟฟ้า BTS สายสีลม

1.5.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับกลยุทธ์เดิมอย่างน้อย 2 กลยุทธ์ ภายใต้ระบบทดสอบและเงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้แบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนที่ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นบนขบวนรถ

1.6.2 ได้กลยุทธ์ใหม่สำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน

1.6.3 สามารถนำหลักการ แนวคิดหรือกลยุทธ์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนในปัจจุบัน เช่น แรงดันตกกำลังไฟฟ้าจ่ายออกสูงที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เป็นต้น

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท 2 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความ เป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาเบื้องต้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อหลัก ได้แก่ การประยุกต์ใช้ OBESS สำหรับการประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้าและเทคนิคการควบคุมการจัดการพลังงานคืนกลับ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วยความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้า ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนในประเทศไทย พลังงานคืนกลับจากการเบรก ระบบเก็บสะสมพลังงานและการจัดการพลังงานในระบบรถไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน การพัฒนาโปรแกรมการจำลองผลระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน รวมทั้งการทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง

บทที่ 5 กล่าวถึงการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ โดยนำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS ได้แก่ กลยุทธ์ควบคุมการตัดค่ายอดของกำลังไฟฟ้า กลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน กลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด รวมทั้งการทดสอบกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด

บทที่ 6 กล่าวถึงการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนร่วมกับ OBESS โดยใช้กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอดที่นำเสนอ รวมทั้งกรณีศึกษาการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่ง โดยใช้แหล่งจ่ายไฟจาก OBESS

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบกลยุทธ์การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดแต่ละวิธี

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาางานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่ใช้ศึกษาและพัฒนากลยุทธ์การควบคุมสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถในระบบรถไฟฟ้า กระแสตรงขนส่งมวลชน สามารถสรุปโดยย่อได้ดังนี้

2.2.1 การประยุกต์ใช้ OBESS สำหรับการประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้า

Matsuda, Ko, and Miyatake (2006) นำเสนอการเดินรถไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดร่วมกับ OBESS ในรถไฟฟ้ากระแสตรงให้ใช้พลังงานน้อยที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ EDLC โดยใช้วิธี Sequential Quadratic Programming (SQP) แก้ปัญหาการควบคุมเหมาะสมที่สุดร่วมกับการแปลงดิสครีต-เวลา (discrete-time transformation) จากผลการดำเนินงานพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถช่วยลดพลังงานที่จ่ายจากสถานีไฟฟ้าโดยการใช้ OBESS อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถลดพลังงานโดยรวมได้อย่างน้อย 0.35% นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่า EDLC ไม่ควรคายประจุเต็มทีเมื่อความดันทานภายในสูง

Lee, Kim, and Lee (2008) ได้นำเสนอการพัฒนาาระบบเก็บสะสมพลังงาน โดยพิจารณาผลกระทบของระบบเก็บสะสมพลังงานด้านการประหยัดพลังงาน ซึ่งใช้ EDLC เป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน คณะวิจัยได้ทำการออกแบบ ติดตั้งและทดสอบภาคสนามที่ LRT test track ตั้งอยู่ในเมือง Gyeongsan ประเทศเกาหลี ระยะทาง 2.37 km ผลจากการทดสอบพบว่าระบบเก็บสะสมพลังงานจะเก็บประจุโดยอาศัยพลังงานคืนกลับจากการเบรกของรถไฟฟ้า และระบบเก็บสะสม

พลังงานจะคายพลังงานช่วยสำหรับการขับเคลื่อนขณะรถไฟเร่งความเร็ว ดังนั้นแรงดันที่สายป้อนจะคงที่ที่พิกัด แต่ในบทความนี้ไม่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบเก็บสะสมพลังงานช่วยประหยัดพลังงานไปเป็นจำนวนเท่าไร

Miyatake, Haga, and Suzuki (2009) ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้ายานส่งมวลเบา (Light Railway Vehicle: LRV) ที่เหมาะสมเพื่อการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดในโหมดการเดินแบบไร้ตัวนำสัมผัส (catenary-free mode) เมื่อติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ และแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการโปรแกรมพลวัต (Dynamic Programming: DP)

Lee, Jeong, and Jeong (2010) ได้นำเสนอการศึกษาอัลกอริทึมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ายานส่งมวลเบาที่รวมกับระบบเก็บสะสมพลังงานของระบบรถไฟฟ้ายานส่งมวลเบา 12 สาย ในประเทศเกาหลี เพื่อหาขนาดของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีที่สุด จากผลการดำเนินงานสรุปได้ว่าอัลกอริทึมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้มากกว่า 90% และสามารถประหยัดพลังงานได้เฉลี่ย 4.26 MWh สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างขบวนรถต่ำ และเฉลี่ย 3.34 MWh สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างขบวนรถสูง

Shimada, Oishi, Araki, and Nakamura (2010) ได้อธิบายคุณสมบัติและประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถและแบบติดตั้งริมทางวิ่งในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้กลับคืนมาจากการเบรก ฮิตาชิเป็นบริษัทที่ทำงานเกี่ยวกับการพัฒนาระบบการประหยัดพลังงานสำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเพื่อช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของระบบรถไฟ สองประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการเบรกคืนพลังงานเป็นการเบรกคืนพลังงานภายใต้เงื่อนไขโหลดเบาบางและข้อจำกัดเกี่ยวกับสมรรถนะเนื่องจากคุณลักษณะของมอเตอร์ฮิตาชิได้มีการพัฒนามาตามลำดับ ฟังก์ชันการดูดกลืนพลังงานไฟฟ้าที่ได้คืนมาและการเบรกคืนพลังงานร่วมกับฟังก์ชันขยายประสิทธิภาพความเร็วถูกนำเสนอในบทความนี้ และได้แนะนำระบบการจัดการพลังงานคืนกลับอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการพิจารณาเมื่อมีการใช้ฟังก์ชันเหล่านี้ สำหรับฟังก์ชันการดูดกลืนพลังงานที่ได้คืนมา ฮิตาชิได้มีการพัฒนาระบบ B-CHOP ติดตั้งริมทางวิ่ง และระบบเบรกคืนพลังงานตามลำดับแบบบนขบวนรถเพื่อให้ระบบที่จะติดตั้งนั้นเหมาะสมกับระบบสายส่งและเงื่อนไขการทำงานอื่น ๆ

Lee, Song, Lee, Lee, Jang, and Kim (2011) นำเสนอการหาขนาดเหมาะสมที่สุดของตัวเก็บประจุยิวคบนระบบรถไฟฟ้ายานส่งมวลเบาโดยตรงโดยใช้อัลกอริทึมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบรถไฟ ทดสอบกับระบบ Seoul Metro Line 7 โดยค่ากำลังไฟฟ้าและขนาดของ

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่เหมาะสมที่สุดสามารถหาได้โดยใช้การหาค่าเหมาะที่สุดของลากรองจ์ (Lagrange optimization) และวิธีการค้นหาแบบวนรอบเกรเดียนต์ (gradient search iteration method) อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดนี้สามารถหาขอบเขตการอัดประจุและคายประจุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละตัวเก็บประจุยิ่งยวดร่วมกับเงื่อนไขพลังงานที่ไม่เพิ่มขึ้นและจำนวนพิกัดร่วมกับขอบเขตการทำงานเหล่านั้น จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงได้เป็นอย่างดี การประหยัดพลังงานโดยรวมเฉลี่ยสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการถึง 27.77% เมื่อมีอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานขนาดพิกัด 478.29 kWh

Leeton, Kulworawanichpong, and Watanabe (2012) นำเสนอวิธีการหาค่าแรงดันคืนกลับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ ซึ่งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถนั้นสามารถเก็บพลังงานที่ได้จากการเบรกและคายพลังงานที่เก็บไว้ขณะที่รถไฟฟ้าอยู่ในโหมดเร่ง เทคนิคนี้สามารถลดการใช้พลังงานของสถานีไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้า บทความนี้ใช้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบสายป้อนรถไฟฟ้ากระแสตรงเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดควอซิ-นิวตันและระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรมถูกนำมาใช้ในการหาค่าแรงดันคืนกลับที่เหมาะสมที่สุด จากผลการดำเนินงานเห็นได้ว่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสียและกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงอย่างมากที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction substation) รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าโดยรวมของระบบมีเสถียรภาพอีกด้วย

Domínguez, Fernández-Cardador, Cucala, and Pecharromán (2012) ได้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างความเร็วระบบการเดินขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Operation: ATO) ที่เหมาะสมที่สุดของรถไฟฟ้าใต้ดิน Madrid Underground โดยคำนึงถึงพลังงานคืนกลับจากการเบรกเพื่อที่จะลดพลังงานโดยรวมที่สถานีไฟฟ้า และนำเสนอแบบจำลองรถไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ รวมถึงแบบจำลองระบบสำหรับการประมาณพลังงานคืนกลับโดยรถไฟฟ้า จากผลการดำเนินงานพบว่า แบบจำลองที่นำเสนอสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการประเมินการประหยัดพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการลงทุนที่เป็นไปได้เพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานคืนกลับ

Lee, Jang, and Hong (2014) ได้นำเสนอการศึกษา OBESS สำหรับการประหยัดพลังงานในรถไฟฟ้า โดยคณะวิจัยได้นำมาศึกษากับระบบรถไฟฟ้าประเทศเกาหลี 4 สาย ได้แก่ Seoul line 1, Inchoen line 1, Daegu line 1 และ Daejeon line 1 จากการจำลองผลพบว่า OBESS สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ 29.76% เมื่อเทียบกับการใช้ TESS ที่คณะวิจัยเคยศึกษาซึ่ง

ประหยัดพลังงานเพียง 18.3% แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้กล่าวถึงข้อมูลของรถไฟ ข้อมูลของ OBESS และวิธีการควบคุมการจัดการพลังงาน

Arboleya, Bidaguren, and Armendariz (2016) ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถและทางเลือกรถอื่น ๆ ในระบบรถไฟรางเบาสมัยใหม่ และนำเสนอกรณีศึกษาเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถและการประหยัดพลังงานในระบบ โดยใช้ระบบทดสอบ 15 km 750 V ประกอบด้วย 10 สถานีจอด 2 สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ซึ่งพบว่าระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับพลังงานคืนกลับอย่างปลอดภัยในระบบรถไฟรางเบาจากมุมมองของความยืดหยุ่นและค่าใช้จ่ายในการลงทุน

2.2.2 เทคนิคการควบคุมการจัดการพลังงานคืนกลับ

Okada, Koseki, and Hisatomi (2004) นำเสนอการควบคุมการจัดการพลังงานในรถไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับระบบเบรกคืนพลังงานกลับของรถไฟฟ้า โดยการปรับปรุง squeezing control ของกำลังไฟฟ้าคืนกลับบนพื้นฐานข้อมูลของวงจรไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้าที่แผนโทกราฟ ระยะทางโดยประมาณและกำลังไฟฟ้าที่ใช้หรือคืนกลับของแต่ละขบวน

Miyatake, Matsuda, and Haga (2006) นำเสนอการอัดประจุและคายประจุของรถไฟร่วมกับอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถเพื่อการประหยัดพลังงานและพิจารณาการเดินทางแบบไร้ตัวนำสัมผัส โดยคณะวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานเทคนิคการหาเหมาะที่สุดแบบทั่วไป ซึ่งการศึกษาใช้ EDLC เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน

Grigans, and Latkovskis (2010) นำเสนอการศึกษากลยุทธ์ควบคุมระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถของรถแตรมในเมืองริกา ประเทศลัตเวีย โดยทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานจากสถานีไฟฟ้าของกลยุทธ์ควบคุมระบบเก็บสะสมพลังงาน 4 วิธี ได้แก่ กลยุทธ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (Mean power control strategy) กลยุทธ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยร่วมกับการพยากรณ์ล่วงหน้า (Mean power control strategy with prediction) กลยุทธ์ควบคุมการตัดค่ายอดของกำลังไฟฟ้า (Peak shaving control strategy) และกลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control strategy) ซึ่งผลการทดสอบแต่ละกลยุทธ์ให้ผลแตกต่างกันขึ้นอยู่กับข้อกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมของแต่ละกลยุทธ์ และไม่สามารถใช้ได้ทั่วไป จะใช้ได้เฉพาะเส้นทางในเมืองริกาเท่านั้น

Iannuzzi, and Tricoli (2010) นำเสนอวิธีการควบคุมอุปกรณ์แปลงกำลังไฟฟ้าดีซี-ดีซีสองทิศทาง (bidirectional dc/dc power converter) ของ OBESS สำหรับ LRV บนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย โดยมีเป้าหมายการควบคุม คือ ชดเชยแรงดันตกของรถไฟ

(train voltage drop) และลดค่ายอดของกระแสในสาย (line current peaks) อีกทั้งยังได้ทำการทดลองทำต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพและใช้ได้จริงกับรถรางไฟฟ้า

Wang, Zhao, Wang, Yang, and You (2011) นำเสนอวิธีการจัดการพลังงานของ OBESS สำหรับรถไฟฟ้าในเมือง วิธีการควบคุมอยู่บนพื้นฐานการจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่าง EDLC และสถานีไฟฟ้า การจำลองและทดลองยืนยันว่าวิธีการควบคุมที่นำเสนอนี้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญในการป้องกันความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าและป้องกันความผิดพลาดในการคืนกลับ

Iannuzzi, and Tricoli (2012) นำเสนออัลกอริทึมควบคุมการจัดการพลังงานแนวทางใหม่สำหรับรถไฟเมโทรบนพื้นฐานการวัดความเร็วและการประมาณความเร็ว เป้าหมายการควบคุมคือเพื่อดึงพลังงานคืนกลับมาเก็บใน EDLC สูงสุดในช่วงที่รถไฟเบรกและจำกัดกระแสสายจ่ายค่ายอด โดยการควบคุมการจัดการพลังงานจะร่วมกับการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ ตั้งแต่การอัดประจุและคายประจุของ EDLC ที่เชื่อมโยงกับการเร่งและเบรกของรถไฟ อัลกอริทึมการควบคุมนี้จะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ EDLC แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอ้างอิงมีการคำนวณบนพื้นฐานการประมาณค่าของแรงเฉื่อยรถไฟ (train inertial force) และการเร่งที่คำนึงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ผลการคำนวณและการทดลองเน้นการลดกำลังไฟฟ้าในสายที่มีผลเนื่องมาจากการลดลงของแรงดันตกในช่วงเร่งและแรงดันกระชากในช่วงเบรก

Jung, Kim, Kang, and Lee (2014) ได้นำเสนอการพัฒนาอัลกอริทึมการอัดประจุแนวทางใหม่สำหรับ OBESS ในรถไฟฟ้ากระแสตรงผ่านการปรับเปลี่ยนน้ำหนักรถไฟแบบเรียลไทม์เพื่อลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดในช่วงที่รถไฟเร่งความเร็ว ในงานวิจัยนี้ใช้ EDLC สำหรับเก็บพลังงานคืนกลับจากการเบรก และได้นำเสนอสูตรคำนวณในการเลือกขนาดของ EDLC โดยใช้ความเร็วสูงสุดของรถไฟในการคำนวณซึ่งจะมีสัมพันธ์กับความสามารถในการเก็บพลังงานได้สูงสุด ทดสอบกับระบบ Gwang-ju Metro Line 1 ประเทศเกาหลี 1500 Vdc ด้วยรถไฟ 2 ขบวน โดยใช้โปรแกรม PSCAD

Takagi, and Amano (2015) ได้นำเสนอการหาเส้นโค้งอ้างอิงสถานะอัดประจุ (reference SOC) ที่เหมาะที่สุดสำหรับการควบคุมการอัดประจุและคายประจุแบบ feed-forward ของ OBESS ในรถไฟฟ้ากระแสตรง จากการประเมินแบบจำลองที่พัฒนาพบว่า ระบบที่มีการติดตั้ง OBESS ร่วมกับการควบคุมแบบ feed-forward ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานโดยกระบวนการออกแบบเส้นโค้งสถานะอัดประจุที่นำเสนอมีการนำเสนอทั้งวิธีการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยมือและการใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงตัวเลข ซึ่งทั้ง 2 วิธีให้ผลที่แตกต่างกันเล็กน้อย

Xia, Yang, Lin, and Chen (2015) ได้นำเสนอแบบจำลองและกลยุทธ์การจัดการพลังงานด้วยสถานะอัดประจุของระบบเก็บสะสมพลังงานตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการปรับตั้งพิกัดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดทั้งหมดได้อย่างเพียงพอ ลดการกระจายกำลังไฟฟ้าและช่วยยืดอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

Talla, Streit, Peroutka, Drabek, and Blahnik (2015) ได้นำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานสำหรับรถแทรกเตอร์ร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงาน supercapacitors โดยใช้ Takagi-Sugeno Fuzzy controller (T-S Fuzzy) ร่วมกับวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน (Differential Evolution: DE) จากผลการทดสอบจะพบว่าวิธีที่นำเสนอให้ผลการประหยัดพลังงานที่ดีกว่าการใช้กลยุทธ์การจัดการพลังงานทั่วไป

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ OBESS สำหรับการประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้าและเทคนิคการควบคุมการจัดการพลังงานคืนกลับจะเห็นว่าการวิจัยก่อนหน้าที่ดำเนินการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ OBESS สำหรับลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดในระบบรถไฟฟ้าอยู่พอสมควร โดยนำเสนอกลยุทธ์หรือเทคนิคการควบคุมการอัดประจุและคายประจุของ OBESS ที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นแบบเรียลไทม์ ผู้วิจัยได้แรงจูงใจจากปัญหาดังกล่าวจึงได้นำเสนอกลยุทธ์การตัดค่ายอดสำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ EDLC ในรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน ในรูปแบบการควบคุมการอัดประจุและคายประจุของ OBESS ให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากที่สุด เพื่อลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟฟ้าในช่วงเร่งและการใช้พลังงานโดยรวมน้อยที่สุด โดยพิจารณาแบบจำลองของ OBESS ในรูปแบบการจัดการไหลของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 5 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้ ระบบรถไฟฟ้กระแสตรงขนส่งมวลชน พลังงานคืนกลับจากการเบรก ระบบเก็บสะสมพลังงาน การจัดการพลังงานในระบบรถไฟฟ้ รายละเอียดดังนี้

3.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้

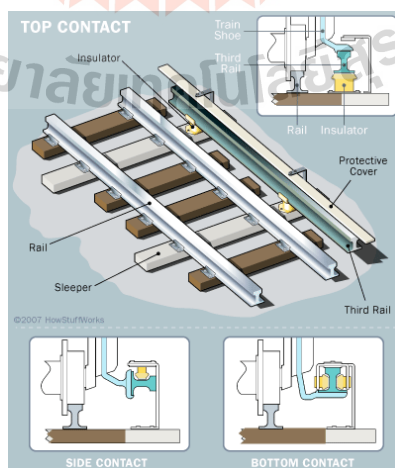
รถไฟฟ้ก็เหมือนกับรถไฟธรรมดาเพียงแต่ต่างกันตรงที่รถไฟฟ้ นั้นจะไม่มีเครื่องยนต์ต้นกำลัง (prime mover) เหมือนเครื่องจักรไอน้ำหรือเครื่องยนต์ดีเซลที่ติดตั้งอยู่บนตัวรถเหมือนรถไฟธรรมดา รถไฟฟ้ใช้พลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้า ดังนั้นการเดินทางรถไฟฟ้จึงต้องมีการสร้างสถานีจ่ายกระแสไฟฟ้ย่อย เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบสายส่งไฟฟ้แรงสูงให้ลงมาอยู่ในระดับที่เหมาะสมเสียก่อน กระแสไฟฟ้ที่ลดแรงดันแล้วจึงจะถูกนำมาส่งเข้าระบบการป้อนกระแสไฟฟ้ (feeding system) เพื่อนำไปใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟ (นคร, 2555)

ระบบไฟฟ้ที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบกระแสตรง (Direct Current: DC) และระบบกระแสสลับ (Alternating Current: AC) ส่วนระบบการป้อนกระแสไฟฟ้เพื่อใช้ขับเคลื่อนรถไฟมี 2 ระบบ คือ ระบบการใช้รางที่สาม (third rail system) และระบบการใช้สายส่งเหนือศีรษะ (overhead wire system) ระบบรางที่สามมีข้อดีในเรื่องของผลกระทบต่อด้านมลพิษทางสายตา ไม่มีโครงสร้างของระบบป้อนกระแสไฟฟ้ที่รุงรังอยู่เหนือรางรถไฟ แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานและด้านความปลอดภัย ระบบนี้จึงมักใช้กับรถไฟใต้ดินหรือระบบขนส่งมวลชนที่อยู่ในเมือง สำหรับระบบสายส่งเหนือศีรษะ จะมีโครงสร้างของระบบป้อนกระแสไฟฟ้ที่รุงรังอยู่เหนือราง ไม่น่าดู มักใช้กับการเดินทางรถไฟฟ้ทางไกล ขบวนรถวิ่งเร็วซึ่งต้องการติดตั้งระบบเดินรถไฟฟ้ที่ใช้แรงดันสูง ไม่สามารถที่ใช้ระบบรางที่สามได้

3.2.1 ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับกระแสดตรง

สถานีจ่ายกระแสไฟฟ้าจะรับไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำการปรับลดแรงดันไฟฟ้าลงก่อนเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสดตรงด้วยหม้อแปลงเรียงกระแส แล้วส่งเข้าระบบจ่ายไฟแบบรางที่สาม ถ้าเป็นกรณีใช้แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 750 V หรือส่งเข้าระบบสายส่งเหนือศีรษะ ถ้าเป็นกรณีใช้แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 750 V ระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบกระแสดตรงทำงานภายใต้ไฟฟ้าแรงดันต่ำจึงต้องติดตั้งจุดจ่ายกระแสไฟฟ้าทุกระยะทาง 3-5 km ขึ้นอยู่กับขบวนรถที่เดินอยู่ในระบบ ในระบบนี้ที่ตัวรถไฟฟ้าจะมีอุปกรณ์ยื่นออกมาจากตัวรถเพื่อสัมผัสกับรางที่สาม กระแสไฟฟ้าจากรางที่สามจะไหลผ่านเข้าไปใช้งานบนรถ และครบวงจรที่รางวิ่ง ซึ่งมีทั้งแบบที่รับกระแสไฟฟ้าจากด้านบน (top contact) แบบรับกระแสไฟฟ้าจากด้านข้าง (side contact) และแบบรับกระแสไฟฟ้าจากด้านล่าง (bottom contact) แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ติดตั้งใช้งาน และแนวคิดของวิศวกรผู้ออกแบบ การรับกระแสไฟฟ้าจากด้านล่างของรางที่สามเป็นวิธีที่นิยมใช้มากเพราะ โอกาสที่จะมีสิ่งแปลกปลอมเข้ามาแทรกทำให้การส่งกระแสไฟฟ้าขัดข้องมีน้อยกว่าแบบอื่น (นคร, 2555)

รางที่สามที่ใช้สำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะต้องมีความมั่นคงแข็งแรง โดยปกติจะมีอุปกรณ์สำหรับยึดจับที่ทุกระยะประมาณ 5 เมตร การติดตั้งรางที่สามไว้ในที่โล่งแจ้งทำให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัย จึงมักจะไม่ใช่รางที่สามกับทางรถไฟที่อยู่บนพื้นดิน ส่วนมากจะใช้กับรถไฟใต้ดินหรือทางยกระดับซึ่งไม่มีคนหรือสัตว์เลี้ยวเดินผ่าน ปัจจุบันการออกแบบรางที่สามจะมีอุปกรณ์ปิดมิดชิดจนเราอาจจะมองไม่เห็นรางที่สามซึ่งวางขนานอยู่กับรางวิ่ง



รูปที่ 3.1 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟแบบรางที่สาม

ที่มาภาพ : <http://science.howstuffworks.com/engineering/civil/subway3.htm> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

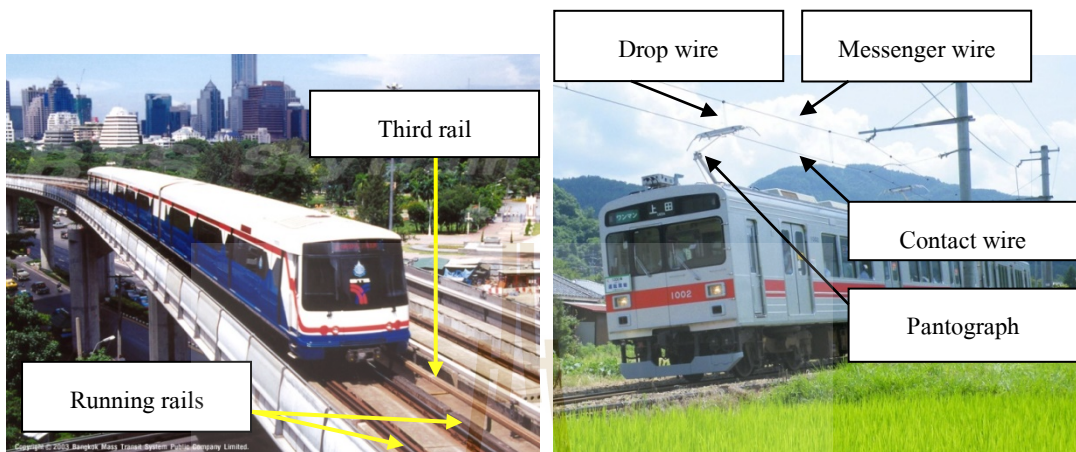
แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้ากระแสตรงมี 4 ระดับตามมาตรฐาน EN 50163 หรือ IEC 60850 ได้แก่ 600 V, 750 V, 1500 V และ 3000 V (ชนิดห้วย, 2557) แสดงดังรูปที่ 3.2 ระดับแรงดันทำงานปกติของระบบการจ่ายไฟให้รถไฟฟ้าตามมาตรฐานดังกล่าวจะต้องมีระดับแรงดันในช่วง U_{min1} ถึง U_{max2} และมีข้อกำหนดเพิ่มเติม คือ การทำงานที่ระดับแรงดันระหว่าง U_{max1} ถึง U_{max2} ต้องมีค่าไม่เกิน 5 นาที ระหว่างแรงดันในช่วง U_{min1} ถึง U_{min2} ต้องมีค่าไม่เกิน 2 นาที ในกรณีของสถานีจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้ระบบรถไฟฟ้าที่ติดตั้งแรงดันไฟฟ้าไว้ตลอดของสถานีเรียงกระแสจะต้องมีค่าไม่เกิน U_{max2} นอกจากนี้แล้ว ในกรณีของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการทำ regenerative braking แรงดันทำงานในขณะนั้นอาจจะเกิน U_{max2} ทำให้เกิดข้อบกพร่องโดยยอมให้แรงดันมีค่าสูงได้ถึง 1000 V ในกรณีของระบบจ่ายไฟ 750 V และ 800 V ในกรณีของระบบจ่ายไฟ 600 V โดยที่พิกัด 600 V จะใช้ในระบบ tramway หรือ trolley bus

Electrification system	Lowest non-permanent voltage U_{min2} V	Lowest permanent voltage U_{min1} V	Nominal voltage U_n V	Highest permanent voltage U_{max1} V	Highest non-permanent voltage U_{max2} V
d.c. (mean values)	400 500 ^c 1 000 2 000	400 500 1 000 2 000	600 ^a 750 1 500 3 000	720 900 ^c 1 800 ^c 3 600	800 1 000 1 950 3 900 ^b
a.c. (r.m.s. values)	11 000 17 500 ^c	12 000 19 000 ^c	15 000 25 000	17 250 27 500 ^c	18 000 29 000
Special national conditions for France, see Annex B.					
^a Future d.c. traction systems for tramways and local railways should conform with system nominal voltage of 750 V, 1 500 V or 3 000 V.					
^b Special national conditions for Belgium, see Annex B.					
^c Special national conditions for United Kingdom, see Annex B.					

รูปที่ 3.2 แรงดันมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163:2004
ที่มาภาพ : (BS EN 50163, 2004)

การจ่ายไฟด้วยรางที่สามดังในรูปที่ 3.3 ก) จะใช้ในกรณีของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีแรงดัน 750 V และมีความเร็วในการให้บริการไม่สูงมากนัก เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1500 V และ 3000 V จะนำรูปแบบการจ่ายไฟผ่านระบบตัวนำสัมผัสพาดอากาศมาใช้งาน ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3 ข) การใช้รางที่สามจะไม่เหมาะสมเนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำของรางที่สามกับรางวิ่งใกล้กันเกินไป ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการทำฉนวนไฟฟ้า การจ่ายด้วยรางที่สามจึงเหมาะกับระบบที่มีพื้นที่จำกัด เช่น ระบบรถไฟฟ้าใต้ดินในอุโมงค์ เป็นต้น การจ่ายไฟจะใช้การแปลงไฟจากสถานีเรียงกระแส โดยทั่วไปจะมีค่าพิกัดอยู่ที่ 1–10 MW ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่

เชื่อมจะขึ้นอยู่กับกรไฟฟ้าของท้องถิ่นว่าจะมีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันเท่าใด สำหรับระบบรถไฟฟ้า BTS และ MRT ใช้ระดับแรงดันปานกลางที่ 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวง



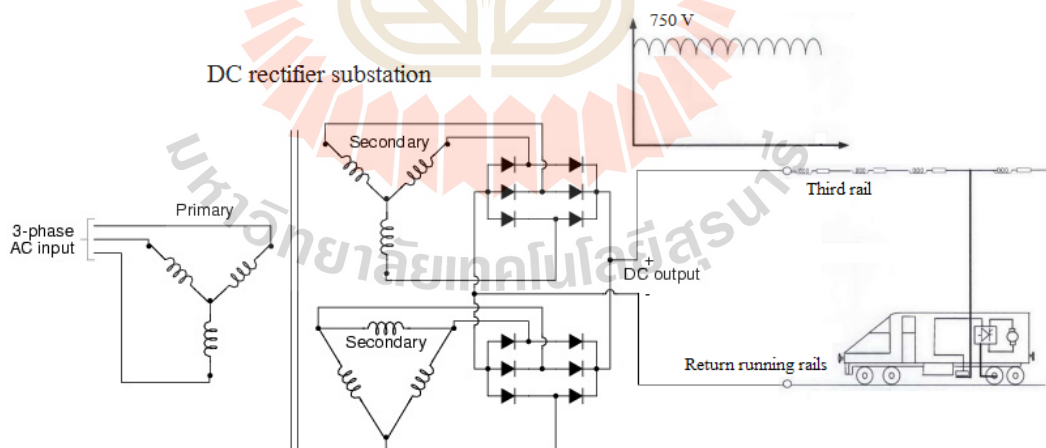
ก) ผ่านรางที่สาม

ข) ผ่านระบบตัวนำสัมผัสพาดอากาศ

รูปที่ 3.3 โครงสร้างการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มาภาพ : www.charoensuk4.com และ http://en.wikipedia.org/wiki/Ueda_Electric_Railway_Bessho_Line

[เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]



รูปที่ 3.4 วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ สำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงตามมาตรฐาน IEC 60146

ที่มาภาพ : (ธนดชัย, 2557)

จำนวนพัลส์ (pulse number) ของวงจรเรียงกระแสจะมีผลต่อความเรียบของระดับแรงดันกระแสตรงเอาต์พุตและขนาดของกระแสกระเพื่อม (ripple current) ซึ่งมีผลต่อระบบ

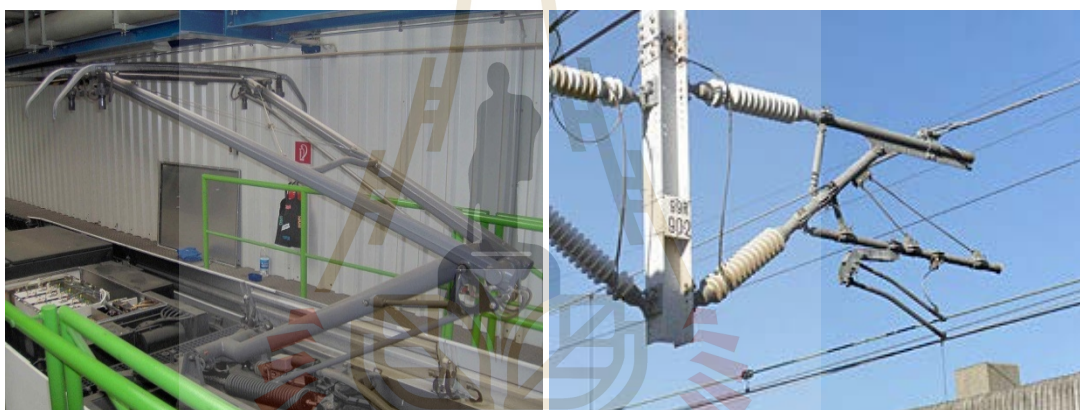
ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าบนขบวนรถ รวมถึงผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ทางด้านกระแสสลับที่จะเกิดขึ้นด้วย จำนวนพัลส์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ต้นทุนของสถานีเรียงกระแสสูงขึ้น แต่สมรรถนะของสถานีไฟฟ้าในฝั่งกระแสตรงจะดีขึ้นด้วย วงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน BTS ของประเทศไทยที่ระดับแรงดัน 750 V ระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงแบบเก่าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 3000 V ของประเทศอิตาลี (ปัจจุบันได้ถูกปรับปรุงเป็นระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV 50 Hz) เป็นต้น หรือวงจรเรียงกระแสแบบ 24 พัลส์ จะถูกนำมาใช้ในงานที่อาจจะเกิดปัญหาเรื่องข้อกำหนดตามมาตรฐานของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งอาจจะเกิดปัญหาจากระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าท้องถิ่นใช้ระบบแรงดันจำหน่ายที่ต่ำ ทำให้เกิดปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกส์ (harmonics) จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า เช่น การเกิดความร้อนเกินที่ตัวเก็บประจุ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า การเกิดสัญญาณรบกวนวงจรควบคุมและวงจรสื่อสาร เป็นต้น การลดผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทำได้โดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีจำนวนพัลส์สูงขึ้น หรือการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก (ชนัดชัย, 2557)

3.2.2 ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับกระแสสลับ

ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับกระแสสลับมีลักษณะคล้ายกับระบบการจ่ายไฟแบบกระแสตรง คือ สถานีจ่ายกระแสไฟฟ้าย่อยจะรับกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำการปรับลดแรงดันไฟฟ้าลงก่อนป้อนเข้าระบบจ่ายไฟของรถไฟผ่านระบบสายส่งเหนือศีรษะ แรงดันไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ แรงดันไฟฟ้า 25 kV Single Phase ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ความถี่กำลังตามระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าของประเทศนั้น ๆ เช่น 16 2/3 Hz เป็นระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าสมัยโบราณในทวีปยุโรปตอนกลางซึ่งยังมีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน 5 ประเทศ ได้แก่ เยอรมัน ออสเตรีย สวิตเซอร์แลนด์ นอร์เวย์ และสวีเดน 25 Hz เป็นระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา บางประเทศใช้ 50/60 Hz เป็นต้น อุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าบนตัวรถที่เรียกว่า แพนโทกราฟ (pantograph) ดังรูปที่ 3.6 ก) ติดตั้งอยู่บนหลังการรถไฟจะยกขึ้นไปสัมผัสกับสายแคทีนารี (catenary) ดังรูปที่ 3.6 ข) เพื่อรับกระแสไฟฟ้ามาใช้บนรถ กระแสไฟฟ้าจะไหลกลับครบวงจรโดยรางวิ่ง



รูปที่ 3.5 รถไฟฟ้าแบบใช้ระบบจ่ายไฟฟ้า 25 kVac แบบใช้สายส่งเหนือศีรษะที่ประเทศเยอรมัน
ที่มาภาพ : <http://pictures.4ever.eu/tag/26102/high-speed-train?pg=2> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]



ก) pantograph

ข) catenary

รูปที่ 3.6 แพนโทกราฟและสายเคทินารี

ที่มาภาพ : [http://en.wikipedia.org/wiki/Pantograph_\(rail\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Pantograph_(rail)) และ

http://www.tekki.co.jp/english/products/shinkansen/shinkansen_product02.html [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

เนื่องจากระบบรถไฟแบบกระแสสลับทำงานที่แรงดันไฟฟ้าสูง สถานีจ่ายกระแสไฟฟ้ามีพิธีการจ่ายไฟได้ไกล จึงสามารถติดตั้งจุดจ่ายกระแสไฟฟ้าไว้ห่างกันได้ โดยปกติจุดจ่ายกระแสไฟฟ้าแห่งหนึ่งจะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ไกล 20-60 km ขึ้นอยู่กับระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เลือกใช้และความหนาแน่นของขบวนรถในทางวิ่ง จึงทำให้ต้นทุนการติดตั้งระบบป้อนกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าแบบใช้กระแสตรง เนื่องจากติดตั้งสถานีจ่ายไฟน้อยกว่า องค์กรที่เลือกใช้ระบบการเดินรถไฟแบบใช้กระแสตรงหรือกระแสสลับมักอยู่ที่การวิเคราะห์ความคุ้มค่า โดยภาพรวม โดยทั่วไประบบขนส่งมวลชนมักมีการเดินรถหนาแน่นมาก เช่น ระบบรถไฟ BTS ซึ่งออกแบบให้สามารถรองรับการเดินรถได้ถึง 40 ขบวนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง หรือเรียกว่ามี

ระยะห่างระหว่างขบวนรถ (headway) 90 วินาที ระบบนี้จะมีต้นทุนโดยรวมต่ำกว่าหากเลือกใช้ระบบไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่การเดินทางไกลมักมีขบวนรถเดินหนาแน่นน้อยกว่า เช่น มีระยะห่างระหว่างขบวนรถ 5-10 นาที กรณีนี้การเลือกใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันสูงจะมีความคุ้มค่ามากกว่า

รถไฟฟ้าได้รับความนิยมแพร่หลายอย่างรวดเร็ว ประเทศที่สังเกตเห็นผลประโยชน์จากการใช้รถไฟฟ้าต่างเร่งติดตั้งระบบการเดินทางไฟฟ้าเพื่อการเดินทางไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามก็ดีเนื่องจากเทคโนโลยีการผลิตกระแสไฟฟ้าก็มีการพัฒนามาเป็นลำดับด้วย ประเทศที่เร่งรัดการติดตั้งระบบเดินทางไฟฟ้าต่างรับเอาเทคโนโลยีในขณะนั้นมาใช้ เมื่อเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปก็อาจจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบการเดินทางไฟฟ้าเสียใหม่หรือถ้าเห็นว่าเปลี่ยนแล้วไม่คุ้มค่าก็จะต้องออกแบบรถไฟฟ้าให้สามารถรับกระแสไฟฟ้าได้หลายระบบ ซึ่งปัจจุบันดำเนินการได้ไม่ยุ่งยาก เช่น รถไฟความเร็วสูง TGV ของประเทศฝรั่งเศสที่ต้องวิ่งผ่านระบบการจ่ายไฟแตกต่างกัน 3 ระบบ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสตรง 1500 V ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV ความถี่ 16 2/3 Hz และระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV ความถี่ 50 Hz

3.2.3 โครงสร้างของขบวนรถไฟฟ้า

โครงสร้างของขบวนรถไฟฟ้าอาจจำแนกออกเป็นสองรูปแบบตามรูปแบบของระบบลากจูง (traction system) ได้แก่ ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ (centralized traction system) รูปแบบนี้จะใช้หัวรถจักรไฟฟ้า (electric locomotive) อย่างน้อยหนึ่งชุดเป็นตัวต้นกำลังติดตั้งระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบรวมศูนย์ หัวรถจักรจะถูกติดตั้งอยู่ทางด้านหน้าของขบวนรถหรือด้านหลังสุดก็ได้ บางครั้งอาจใช้หัวรถจักรสองหัวติดตั้งที่ปลายทั้งสองด้าน ผู้โดยสารระหว่างกลางจะไม่มีระบบมอเตอร์ขับเคลื่อน รูปแบบที่สองเป็นระบบลากจูงแบบแยกส่วน (decentralized traction system) รูปแบบนี้ตัวขบวนรถจะจัดโครงสร้างมาเป็นเซตมีการติดตั้งห้องควบคุมหรือห้องคนขับที่ปลายทั้งสองด้าน ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์จะถูกติดตั้งกระจายไปตามส่วนต่าง ๆ ไม่รวมกันอยู่ที่ด้านหน้าหรือส่วนใดส่วนหนึ่งเหมือนรูปแบบแรก เรียกขบวนนี้ว่า รถไฟฟ้าราง (Electric Multiple Unit: EMU) ความแตกต่างระหว่างรูปแบบทั้งสองนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7



ก) Locomotive

ข) EMU

รูปที่ 3.7 โครงสร้างการจัดระบบลากจูงแบบ Locomotive และ EMU

ที่มาภาพ : https://voith.com/aut-en/1981_e_g1570_en_digest_schiene_2016-09.pdf [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]



ก) Locomotive

ข) EMU

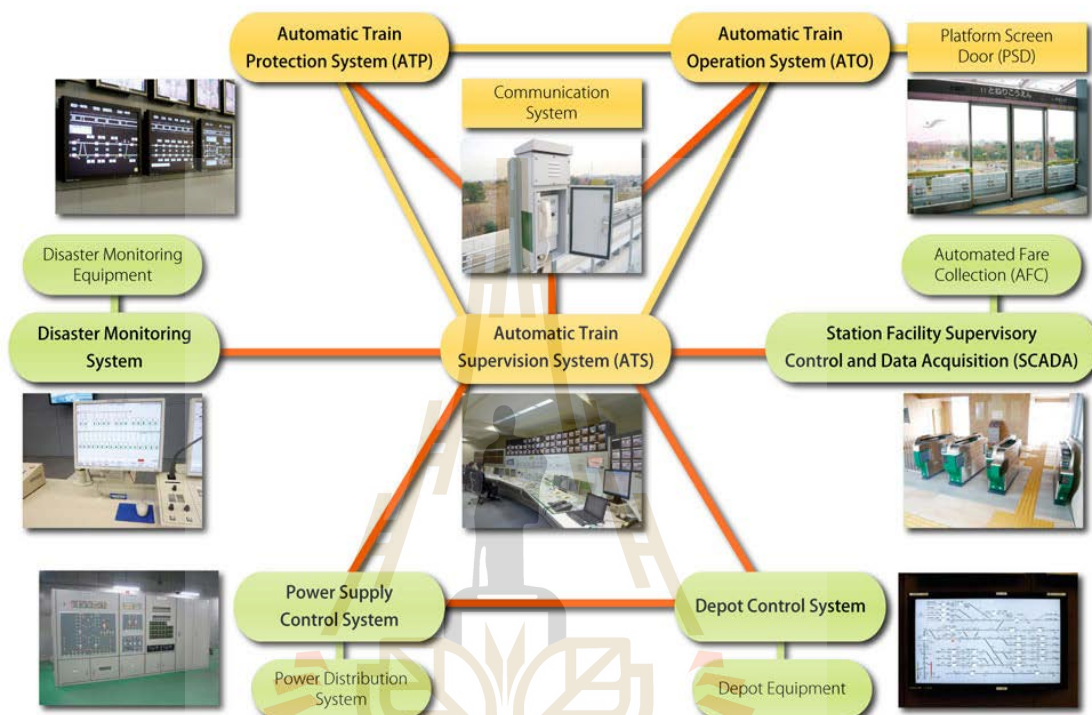
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างหัวรถจักรไฟฟ้าแบบ Locomotive และ EMU

ที่มาภาพ : http://www.eurorailhobbies.com/erh_detail.asp?ca=2&stock=R-72615 และ
<http://kockice.hr/forum/viewtopic.php?f=40&t=6268&start=40> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

3.2.4 ระบบควบคุมขบวนรถอัตโนมัติ

ระบบควบคุมขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Control: ATC) เป็นเทคโนโลยีสำหรับควบคุมการเดินทางขบวนรถไฟขนส่งมวลชนและรถไฟความเร็วสูงสมัยใหม่ ATC ในประเทศอังกฤษ หมายถึง ระบบควบคุมการเดินทางขบวนรถอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เตือนคนขับรถไฟก่อนจะมีการพัฒนาระบบเตือนอัตโนมัติ (Automatic Warning System: AWS) แต่ในอเมริกาจะหมายถึงแนวคิดในการควบคุมการเดินทางขบวนรถไฟสมัยใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ได้แก่ กลุ่มระบบป้องกันขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Protection: ATP) กลุ่มระบบการเดินทางขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Operation: ATO) และกลุ่มระบบบริหารการเดินทางขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Supervision: ATS) ดังนั้นคำว่า ATC ในระบบควบคุมการเดินทางขบวนรถสมัยใหม่จึงหมายความรวมถึง ATP ATO และ ATS ระบบ ATC ที่ใช้กันอยู่ทั่วโลก อาจมีรายละเอียดปลีกย่อยที่แตกต่างกันบ้าง แต่โดยหลักการทั่วไปแล้วก็จะคล้ายคลึงกัน โดยจะประกอบด้วยระบบ ATO เป็นระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานต่าง ๆ ของขบวนรถไฟฟ้า เช่น การขับเคลื่อนรถไฟ การควบคุมความเร็วของรถไฟ การควบคุมการห้ามล้อ การจอดรถไฟ และการรายงานสถานะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในตัวรถไฟไปยังศูนย์ควบคุม ระบบ ATP เป็นระบบที่คอยควบคุมไม่ให้รถไฟใช้ความเร็วเกินกำหนด ควบคุมความเร็วรถไฟให้อยู่ในพิสัยความเร็วที่สัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างรถไฟข้างหน้า หากเกิดเหตุผิดปกติ ระบบ ATP จะสั่งการห้ามล้ออัตโนมัติ นอกจากนี้ยังควบคุมการเคลื่อนตัวของรถไฟจากสถานีรถไฟ โดยหากประตูรถไฟและประตูกันชนขบวนรถไฟยังไม่เรียบร้อย ระบบ ATP จะไม่อนุญาตให้รถไฟเคลื่อนตัวออกจากสถานี ต่างจากระบบ ATO ตรงที่มีความอิสระต่างกัน กรณีที่ระบบ ATO ขัดข้อง ต้องใช้คนควบคุมการเดินทาง และระบบ ATS

เป็นระบบที่คอยควบคุมการเดินรถไฟฟ้าทั้งระบบให้เดินไปตามตารางการเดินรถ โดยจะส่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ความเร็วของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน ติดตามและแสดงตำแหน่งของรถไฟฟ้าทุกขบวนที่อยู่ในระบบ และจัดเตรียมขั้นต้นต่าง ๆ ในการควบคุมการเดินรถ เมื่อระบบการเดินรถมีเหตุขัดข้อง (นคร, 2555)



รูปที่ 3.9 ระบบควบคุมขบวนรถอัตโนมัติ

ที่มาภาพ : <http://www.kobelco.co.jp/english/products/traffic/index.html> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

3.2.5 หัวรถจักรไฟฟ้าและมอเตอร์ลากจูง

การขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยไฟฟ้าถือกำเนิดขึ้นมาก่อนเครื่องยนต์ดีเซลนานมากกว่า ศตวรรษ ระบบลากจูงด้วยไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานได้เริ่มทดลองขึ้นใช้งานครั้งแรกที่เมืองเดเวนพอร์ต (Davenport) มลรัฐแมสซาชูเซต สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1837 และเมืองเดวิดสัน (Davidson) สก็อตแลนด์ สหราชอาณาจักร ในปี ค.ศ. 1838 ประมาณ 40 ปีต่อมา ระบบลากจูงที่จ่ายไฟผ่านสายไฟฟ้าโดยการลากสายไฟไปตามรางได้ถูกสาธิตการใช้งานที่เมืองเบอร์ลิน (Berlin) ประเทศเยอรมัน โดย เวอร์เนอร์ ซีเมนส์ (Werner von Siemens) ในปี ค.ศ. 1879 และในปี ค.ศ. 1881 ได้มีการสร้างสายรถแตรม (tram line) เชื่อมระหว่างเบอร์ลินและย่านลิชเตอร์เฟลด์ (Lichterfelde) แถบชานเมืองทิศตะวันตกเฉียงใต้ ในปี ค.ศ. 1883 โวลค์ (Volk) แห่งไบรตัน

(Brighton) สหราชอาณาจักร ได้สร้างระบบรางรถไฟไฟฟ้าขึ้นให้บริการเป็นครั้งแรก สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกาได้การก่อสร้างระบบรถรางไฟฟ้า (electric streetcar) ขึ้นที่เมืองคลีฟแลนด์ (Cleveland) มลรัฐโอไฮโอ ในปี ค.ศ. 1984 หลังจากนั้นเป็นต้นมา ระบบรถไฟฟ้านี้ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายไปทั่วโลกจนถึงปัจจุบัน (ธนัชชัย, 2557)

การใช้งานในยุคเริ่มต้นตามตัวอย่างก่อนหน้านี้นี้ทั้งหมดใช้มอเตอร์กระแสตรงรับไฟฟ้าจากสายจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ ข้อดีของการจ่ายไฟรูปแบบนี้คือความง่ายในการควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวต้านทาน พัฒนาการระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ลากจูงในยุคต่อมาเน้นการใช้มอเตอร์กระแสตรงแต่ใช้แนวทางการจ่ายไฟฟ้า 2 รูปแบบ คือ การใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรงแรงดันต่ำขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง และการใช้ระบบจ่ายไฟกระแสสลับแรงดันสูงความถี่ต่ำ (ในขณะนั้นประเทศในทวีปยุโรปตอนกลางใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 16 2/3 Hz สหรัฐอเมริกาใช้งานที่ความถี่ 25 Hz) ขับเคลื่อนมอเตอร์คอมมิวเตเตอร์กระแสสลับหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า มอเตอร์ยูนิเวอร์แซล ต้องรอจนกระทั่งทศวรรษที่ 50 (ค.ศ. 1950 – ค.ศ. 1960) เมื่อเทคโนโลยีของวงจรเรียงกระแสด้วยเมอร์คิวรีอาร์ค (mercury arc) และสารกึ่งตัวนำจำพวกไดโอดและไทรสเตอร์ ได้รับการพัฒนาให้มีพิกัดกำลังสูงขึ้นสำหรับใช้ในงานมอเตอร์ไฟฟ้าลากจูงได้ การรถไฟฝรั่งเศสได้บุกเบิกสร้างรางไฟฟ้าจ่ายไฟความถี่ 50 Hz ขึ้นใช้งานครั้งแรกที่สาย วาล็องเซียน-ดีองวิลล์ (Valenciennes–Thionville) หลังจากนั้นเป็นต้นมา ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว 25 kV 50/60 Hz ได้กลายมาเป็นมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับรางรถไฟสายหลัก (mainline railway electrification) แทนที่ระบบจ่ายไฟกระแสตรง 1500 V ที่เริ่มใช้งานมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 และระบบจ่ายไฟกระแสตรง 3000 V ที่เริ่มใช้งานมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930

ตอนต้นของศตวรรษที่ 20 ได้มีความพยายามนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มาใช้งานกับระบบลากจูง โดยเริ่มต้นทดลองที่ประเทศเยอรมัน และก่อสร้างเพื่อใช้งานจริงสาย Bergdorf–Thun ในประเทศสวิสเซอร์แลนด์เมื่อปี ค.ศ. 1899 และประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1909 การทดลองมีทั้งแบบที่ใช้สายพาดอากาศ 3 เส้น จ่ายไฟให้แพนโทกราฟ 3 ชุด และแบบที่ใช้สายพาดอากาศ 2 เส้น ร่วมกับรางอีก 1 ตัวนำ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับนี้ใช้การเปลี่ยนขั้วแม่เหล็ก (pole-changing) ควบคู่กับการปรับแรงดันและความต้านทานที่โรเตอร์ (rotor resistance control) ในช่วงปี ค.ศ. 1960 – ค.ศ. 1970 การนำไทรสเตอร์มาใช้งานทำให้มีการทดลองใช้การขับเคลื่อนหัวรถจักรไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำจ่ายไฟจากอินเวอร์เตอร์ แต่มีข้อจำกัดด้านพิกัดกระแสและแรงดันของอุปกรณ์ ต้องใช้การต่ออุปกรณ์แบบขนานและอนุกรมช่วยเพื่อสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ให้มีระดับแรงดันและพิกัดกระแสที่เหมาะสม จนกระทั่งอีกหนึ่งทศวรรษถัดมา เมื่อมีการสร้างไทรสเตอร์กำลังสูง (high-power thyristor) ขึ้นใช้

งาน ทำให้มีการพัฒนาอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI) สำหรับงาน รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง ต่อมาการสร้างอุปกรณ์จีทีโอ (Gate-Turn-Off Thyristor: GTO) และอุปกรณ์ไอจีบีที (Insulated-Gate Bipolar Transistor: IGBT) ตามลำดับ ได้เปลี่ยนรูปแบบการควบคุมระบบขับเคลื่อนให้มาใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (VSI-IM drive) เมื่อการพัฒนาทำต่อเนื่องมาจนถึงช่วงทศวรรษที่ 80 (ค.ศ. 1980 – ค.ศ. 1990) วงจรขับเคลื่อนได้รับการพัฒนามาถึงจุดที่ใช้การควบคุมรูปแบบของพัลส์คอนเวอร์เตอร์ (pulse converter) ที่ควบคุมการทำงานแบบ 4QC (four-quadrant control) ทำให้สามารถขับเคลื่อนหัวรถจักรไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จากระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV 50 Hz หรือระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 1500 V หรือ 3000 V ได้

3.3 ระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนในประเทศไทย

การขนส่งมวลชนระบบรางในประเทศไทยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ รถไฟทางไกลและรถไฟฟ้า โดยรถไฟทางไกลอยู่ในความรับผิดชอบของการรถไฟแห่งประเทศไทย ปัจจุบันมีระยะทางที่เปิดการเดินรถแล้วรวมทั้งสิ้น 4346 km ทั่วประเทศ ขนาดความกว้างของรางรถไฟ 1 m (metre gauge) การขับเคลื่อนใช้รถจักร 3 ประเภท ได้แก่ 1) รถจักรดีเซลไฟฟ้า (diesel electric locomotives) เป็นรถจักรที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีต้นกำเนิดจากเครื่องยนต์ดีเซล โดยที่เครื่องยนต์ดีเซลจะหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าไปจ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนเพลาลูกเบี้ยวที่ต่อไป 2) รถจักรดีเซลไฮดรอลิก (diesel hydraulic locomotives) เป็นรถจักรที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก และ 3) รถดีเซลราง (diesel multiple units) เป็นรถโดยสารที่มีเครื่องยนต์ดีเซลขับเคลื่อนด้วยตนเอง ส่วนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยมีหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบสามหน่วยงาน คือ การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) และกรุงเทพมหานคร (กทม.) ซึ่งเกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงเพียง 2 หน่วยงาน คือ รฟม. และ กทม.

1) การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (Mass Rapid Transit Authority of Thailand: MRTA) เรียกโดยย่อว่า “รฟม.” เป็นรัฐวิสาหกิจในสังกัดกระทรวงคมนาคม มีภาระหน้าที่ในการจัดให้มีและให้บริการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรุงเทพและปริมณฑล และจังหวัดอื่น ๆ การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยได้เปิดบริการเดินรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศ โดยใช้ชื่อว่า “รถไฟฟ้ามหานคร (Metropolitan Rapid Transit: MRT)” โดยแบ่งเป็นหลายสาย ได้แก่ 1) รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล (สายสีน้ำเงิน): ช่วงหัวลำโพง-บางซื่อ เปิดใช้เมื่อ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2547 เป็นโครงการใต้ดินตลอดสาย รางมาตรฐาน UIC 54 กว้าง 1.435 m

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 750 V โดยรางที่สาม ระยะทาง 20 km รวม 18 สถานี ระยะห่างระหว่างสถานีเฉลี่ย 1 km ใช้รถไฟฟ้ารุ่น Modular Metro ของบริษัท ซีเมนส์ ตัวอย่างขบวนรถแสดงดังรูปที่ 3.10 โดยเป็นรถไฟฟ้าขนาดใหญ่ (heavy rail) ขนาดกว้าง 3.2 m ยาว 19.23 m และสูงประมาณ 3.8 m ใช้ล้อเหล็กวิ่งบนรางเหล็ก ตัวรถมีระบบปรับอากาศ สามารถจุผู้โดยสารได้ 320 คนต่อคัน มีทั้งสิ้น 19 ขบวน ในแต่ละขบวนพ่วงรถ 3 คัน (รวมทั้งหมด 57 คัน) ประกอบด้วยรถมีห้องคนขับ 2 คัน (A-Car) อยู่หัวกับท้ายขบวน และรถไม่มีห้องคนขับ (C-Car) อยู่กลางขบวน รถไฟฟ้ามีอัตราความเร็วสูงสุด 80 km/h แต่ในการเดินรถจะใช้อัตราความเร็วเฉลี่ย 35 km/h ความถี่ต่อขบวนรถในการให้บริการชั่วโมงเร่งด่วน (06.00-09.00 น.) 2-4 นาทีต่อขบวน ชั่วโมงปกติ 4-6 นาทีต่อขบวน ให้บริการได้มากกว่า 40000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทางไป - กลับ เป็นสัมปทานของบริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (Bangkok Expressway and Metro Public Company Limited: BEM) ส่วนต่อขยายช่วงบางซื่อ-ท่าพระ ระยะทาง 13 km รวม 7 สถานี และหัวลำโพง-หลักสอง ระยะทาง 14 km รวม 10 สถานี อยู่ระหว่างการก่อสร้าง 2) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (บางใหญ่-ราษฎร์บูรณะ): ช่วงบางใหญ่ - บางซื่อ (สถานีคลองบางไผ่ - สถานีเตาปูน) ระยะทาง 22 km รวม 16 สถานี อยู่ระหว่างการก่อสร้าง 3) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีส้ม (บางขุนนนท์-มีนบุรี) 4) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีชมพู (ศูนย์ราชการจังหวัดนนทบุรี - มีนบุรี) 5) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีเหลือง (รัชดาภิเษก/ลาดพร้าว-สำโรง) และ 6) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำตาล (ศูนย์ราชการจังหวัดนนทบุรี-สัมมากร)



รูปที่ 3.10 ลักษณะตัวขบวนรถไฟฟ้าของ MRT

ที่มาภาพ : <http://www.bangkokmetro.co.th/metrosys.aspx?Lang=En&Menu=37> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ามหานครจะมาจากการไฟฟ้านครหลวง ผ่านมายังสถานีไฟฟ้าแม่ข่าย (Bulk Substation: BSS) เพื่อทำหน้าที่แปลงระดับแรงดัน 69 kV เป็นระดับแรงดัน 24 kV แล้วจ่ายไฟฟ้าให้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction Substation: TSS) และสถานีไฟฟ้าบริการ (Service Substation: SSS) ตัวอย่างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้า ซึ่งในแต่ละ TSS จะประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ตัดต่อนางแหวนระดับแรงดัน 24 kV หม้อแปลงระบบ

ให้บริการ 2 สาย คือ รถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ สาย 1 หรือ สายสุขุมวิท (สายสีเขียวอ่อน ระยะทาง 17 km เมื่อเริ่มเปิดให้บริการ และอีก 5.25 km สำหรับส่วนต่อขยาย) ระยะทางรวมทั้งสิ้น 22.5 km มี 22 สถานี และรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ สาย 2 หรือ สายสีลม (สายสีเขียวเข้ม ระยะทาง 6.5 km เมื่อเริ่มเปิดให้บริการ และอีก 8.17 km สำหรับส่วนต่อขยาย) ระยะทางรวมทั้งสิ้น 14.2 km มี 13 สถานี

รถไฟฟ้าบีทีเอสเป็นรถขนส่งมวลชนความจุสูงแบบมาตรฐานที่ใช้กันแพร่หลายในเมืองใหญ่ ๆ ของหลายประเทศทั่วโลก ขบวนรถใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน วิ่งบนรางคู่ยกระดับ ความกว้างราง 1.435 m แยกทิศทางไปและกลับ มีรางจ่ายกระแสไฟฟ้า (conductor rail) หรือ ระบบการใช้รางที่สามอยู่ด้านข้าง ซึ่งมีความปลอดภัยสูงและไม่มีผลกระทบต่อทัศนียภาพ ระบบจ่ายไฟกระแสตรง 750 V 50 Hz จากรางที่สาม ผ่านชุดแปลงกระแสไฟฟ้าสลับระบบขับเคลื่อน (traction converter units) เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 400 V ให้กับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งอยู่บนเพลาล้อของรถ ซึ่งระบบรถไฟฟ้าจะมี 2 ระบบ คือ SIEMENS Model และ CNR Model ลักษณะตัวขบวนรถไฟฟ้าทั้งสองแสดงดังรูปที่ 3.12 มีความจุมากกว่า 50000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง การควบคุมใช้ระบบคอมพิวเตอร์สั่งการ ในส่วนของระบบอาณัติสัญญาณถูกออกแบบให้มีความปลอดภัยสูง แม้เมื่อมีการขัดข้องของระบบเกิดขึ้น ระบบจะปรับไปสู่สถานะที่ยังคงให้ความปลอดภัยแก่ผู้โดยสารเสมอ โดยเฉพาะในเรื่องความปลอดภัยนั้น ระบบปฏิบัติการเดินรถของบีทีเอส มีระบบควบคุมต่าง ๆ รองรับอยู่ เช่น ระบบป้องกันการชน ระบบควบคุมความเร็ว เป็นต้น



รูปที่ 3.12 ลักษณะตัวขบวนรถไฟฟ้าของ BTS

ที่มาภาพ : <http://www.oknation.net/blog/mrtaweesak/2010/12/16/entry-1> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

SIEMENS Model : ขบวนรถไฟฟ้าโมเดลนี้จะเป็นแบบ 4 ตู้ มีทั้งสิ้น 35 ขบวน ซึ่งประกอบด้วย ตู้รถไฟฟ้ามีระบบขับเคลื่อน (motor cars) ที่ด้านหน้าและท้ายของขบวนรถไฟฟ้า และตู้รถไฟฟ้าแบบไม่มีระบบขับเคลื่อน (trailer cars) 2 ตู้อยู่ตรงกลางของขบวนรถไฟฟ้า ตามชนิดดังต่อไปนี้

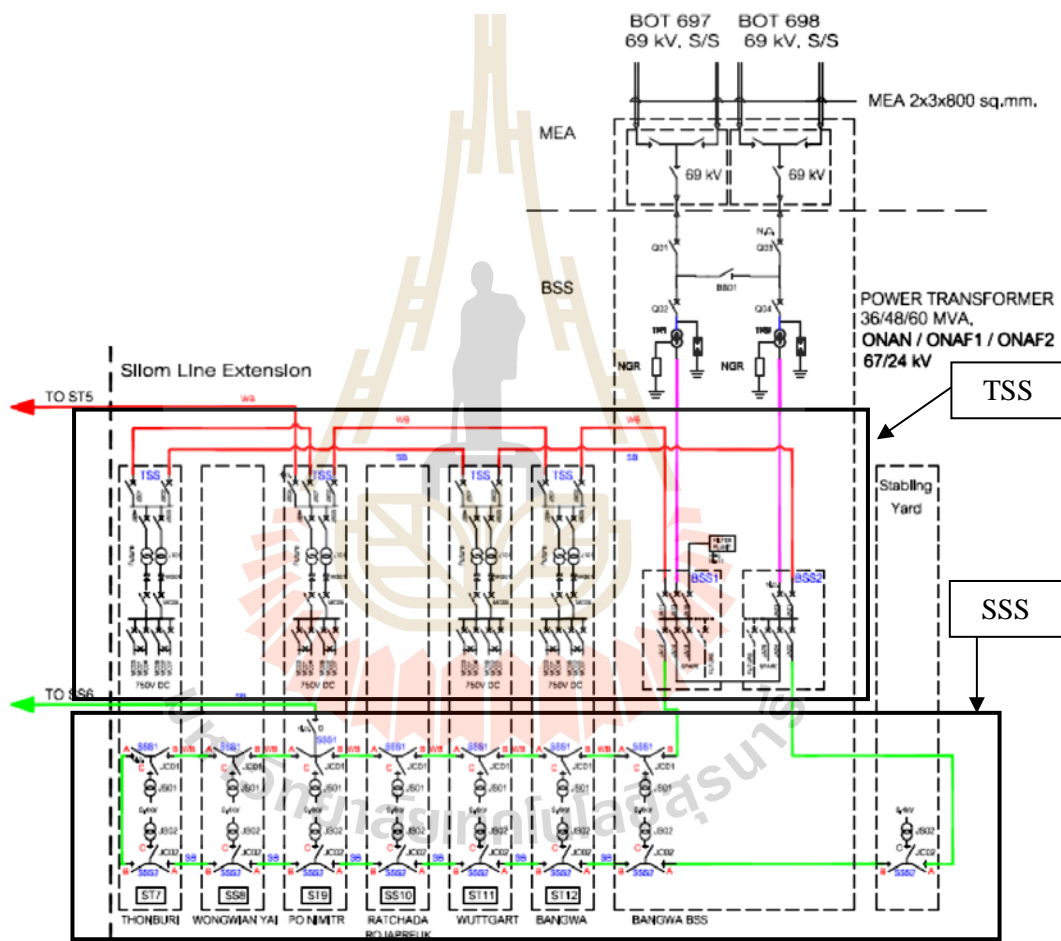
1. ตู้รถไฟฟ้าแบบ A-Car มีระบบขับเคลื่อนและห้องคนขับ (driving cab)
2. ตู้รถไฟฟ้าแบบ C-Car ไม่มีระบบขับเคลื่อนและห้องคนขับ แต่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบปรับอากาศและระบบแสงสว่าง

ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 V จากรางที่สาม ผ่านชุดแปลงกระแสไฟฟ้าสลับระบบขับเคลื่อน เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งอยู่บนเพลาล้อของรถ A-car ทั้งสองตู้ ในทำนองเดียวกันตู้รถไฟฟ้า C-car ทั้งสองตู้ตรงกลางได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 V จากรางที่สาม แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 400 V และไฟฟ้ากระแสตรง 110 V เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ และชาร์จแบตเตอรี่ ตามลำดับ ขบวนรถไฟฟ้า 4 ตู้ มีความยาวตลอดทั้งขบวน 86.6 m กว้าง 3.12 m รองรับผู้โดยสารได้สูงสุดจำนวน 1490 คน (มีผู้โดยสารนั่งเต็มทุกที่นั่ง และผู้โดยสารยืน) ที่น้ำหนักบรรทุกทุก (load condition) 8 คนต่อตารางเมตร จำนวนที่นั่งผู้โดยสาร 42 ที่นั่ง ต่อตู้ และ 168 ที่นั่งทั้งขบวน มีประตูโดยสารเลื่อนเปิดปิดด้านนอกตัวรถ (sliding door) ควบคุมการทำงานด้วยระบบควบคุมกับมอเตอร์ไฟฟ้า มีความกว้างเมื่อเปิดสุด 1.4 m จำนวน 16 บานต่อด้าน ตัวรถทำด้วยเหล็กปลอดสนิม ติดตั้งระบบปรับอากาศ พร้อมหน้าต่างชนิดกันแสง

CNR Model : ขบวนรถไฟฟ้าโมเดลนี้เป็นขบวนใหม่รุ่นล่าสุดจะเป็นแบบ 4 ตู้ มีทั้งสิ้น 12 ขบวน ประกอบด้วยตู้รถไฟฟ้าไม่มีระบบขับเคลื่อนมีห้องขับเรียกว่า TC-Car หรือ Trailer Car จำนวนสองตู้อยู่ที่ด้านหน้าและด้านหลังขบวน และตู้รถไฟฟ้าแบบมีระบบขับเคลื่อนแต่ไม่มีห้องขับเรียกว่า M-Car หรือ Motor Car จำนวนสองตู้อยู่ตรงกลางขบวน ตู้รถไฟฟ้า TC-car แต่ละตู้ติดตั้งระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า ACM ขนาด 140 KVA 3-เฟส 400 V ACM แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 V จากรางที่สาม ไปเป็น 3-เฟส 400 V เพื่อจ่ายให้กับระบบปรับอากาศ ระบบลมอัด ระบบแสงสว่างภายในและภายนอก และโหลดต่าง ๆ นอกจากนั้นแล้ว ACM ยังติดตั้งเครื่องประจุไฟขนาด 22 kW 110 Vdc สำหรับแบตเตอรี่ของตู้รถไฟฟ้า TC-car สำหรับตู้รถไฟฟ้า M-car เป็นตู้รถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อน และไม่มีห้องขับ แต่ละตู้ติดตั้งระบบขับเคลื่อนที่เรียกว่า MCM เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อน ตู้รถไฟฟ้า M-car ที่ได้รับ ไฟฟ้า 750 V จากรางจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สาม ความยาวตลอดทั้งขบวน 87.25 m และกว้าง 3.12 m ตู้รถไฟฟ้า TC-car และ M-car มีที่นั่ง 42 ที่นั่ง จำนวนรองรับผู้โดยสารได้สูงสุดที่น้ำหนักบรรทุก 8 คนต่อตารางเมตร จำนวนผู้โดยสารสูงสุดของแต่ละตู้รถไฟฟ้า TC-car และ M-car จำนวน 361 คน และ 384 คน ตามลำดับ จำนวนผู้โดยสารทั้งขบวนสูงสุด 1490 คน ตัวรถทำจากเหล็กปลอดสนิมมีน้ำหนักเบาโครงสร้างเป็นแบบขึ้นรูปเชื่อมประกอบแต่ละตู้รถไฟฟ้าติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบติดตั้งบนหลังคาจำนวนสองเครื่องใช้น้ำยาทำความเย็น R407C ที่ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม การควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง

โดยสารใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ (TCMS) ประจําผู้โดยสารติดตั้งแต่ละด้านของตู้รถไฟ 4 ขบวน ควบคุมและสั่งการด้วยระบบไฟฟ้า แบบเลื่อนปิดเปิดด้านนอกตัวรถ

ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟ BTS จะมาจากการไฟฟ้านครหลวง ผ่านมายังสถานีไฟฟ้าแม่ข่ายที่ ระดับแรงดัน 69 kV และแปลงเป็นระดับแรงดัน 24 kV แล้วจ่ายไฟฟ้าให้สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และสถานีไฟฟ้าบริการเหมือนกับระบบของรถไฟ MRT ตัวอย่างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟ BTS แสดงดังรูปที่ 3.13



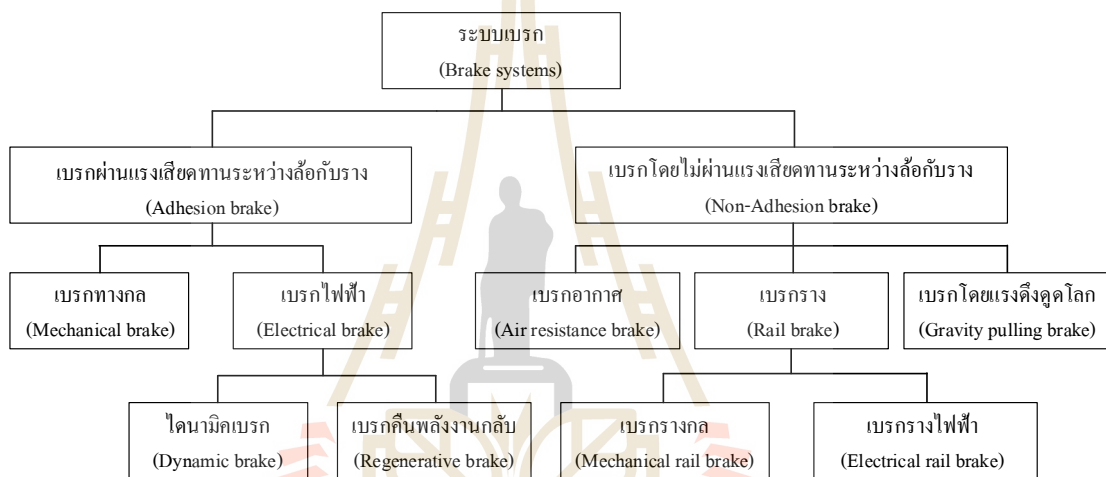
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟ BTS สายสีลม ส่วนต่อขยาย

รถไฟขบวนส่งมวลชนมีกักตังไฟฟ้าประมาณ 1-2 MW ต่อขบวนรถ ทั้งรถไฟ MRT และ BTS รับไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สามที่ระดับแรงดัน 750 V ยกเว้นรถไฟ SARL ที่รับไฟฟ้ากระแสลับที่ระดับแรงดัน 25 kV 50 Hz ผ่านตัวนำสัมผัสผาดอากาศ รถไฟขบวนส่งมวลชนนี้มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ระยะห่างระหว่างขบวนรถสองขบวนประมาณ 120 วินาที เมื่อมี

รถวิ่งอยู่ในระบบไฟฟ้าหลายขบวนบางขบวนดึงกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดเพื่อเร่งความเร็ว บางขบวนอาจจะเบรก บางขบวนเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย ส่งผลให้คุณสมบัติของโพลตรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งแตกต่างจากโพลของสถานีจ่ายไฟทั่วไปของการไฟฟ้าฯ

3.4 พลังงานคืนกลับจากการเบรก

การเบรกขบวนรถไฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แบบที่เบรกโดยใช้แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง (Adhesion brake) และแบบที่เบรกโดยไม่ใช้แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง (Non-adhesion brake) ซึ่งทั้ง 2 ประเภท มีวิวัฒนาการแตกแขนงออกไปดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ประเภทของระบบเบรกของรถไฟ

การเบรกโดยใช้แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง สามารถแยกออกเป็น 2 ชนิด คือ เบรกทางกล (mechanical brake) และเบรกไฟฟ้า (electrical brake) รายละเอียดดังนี้

1) เบรกทางกล คือ ระบบเบรกแบบดั้งเดิมซึ่งมีวิวัฒนาการมาพร้อมกับการสร้างรถไฟวิธีสร้างให้เกิดแรงเบรกอาจใช้แรงซึ่งเกิดจากใช้คนบังคับเบรกหรือใช้แรงจากกระบอกลูกสูบเบรกไปดึงหรือดันคันเบรกไปกดแผ่นเบรกลงบนพื้นล้อหรือจานเบรก

2) เบรกไฟฟ้า คือ ระบบที่พัฒนาขึ้นมาช่วยสนับสนุนการทำงานของเบรกทางกลเพราะเบรกไฟฟ้าไม่มีการสึกหรอ เบรกไฟฟ้าสามารถแยกตามระบบการทำงานได้ 2 ชนิด คือ ไดนามิกเบรก (dynamic brake) และเบรกคืนพลังงานกลับ (regenerative brake) โดยแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

- ไดนามิกเบรก ใช้กับขบวนรถไฟที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยเปลี่ยนจากมอเตอร์หมุนล้อนมาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งถูกล๊อคขั้วให้หมุนแล้วนำกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปผ่านชุดความต้านทาน ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนและถูกพัดลมระบายความร้อนเป่าทิ้งไปในอากาศ

- เบรกคืนพลังงานกลับ ใช้หลักการเดียวกันกับไดนามิกเบรก เพียงแต่ไม่เป่าความร้อนที่เกิดขึ้นทิ้งไปในอากาศ แต่นำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟที่อยู่ใกล้เคียง ขบวนที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า หรืออาจจะเก็บไว้ในอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแล้วนำกลับมาใช้ช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าช่วงที่เร่งความเร็ว

การเบรกคืนพลังงานกลับเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบขับเคลื่อนรถไฟ (Sheu, and Lin, 2012) ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 8-25% ของการใช้พลังงานทั้งหมดของรถไฟ ขึ้นอยู่กับรอบการขับและกลยุทธ์ควบคุม (Xu et al., 2011) โดยทั่วไปพลังงานคืนกลับที่ได้จากการเบรกสามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงาน

3.4.1 การจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรกด้วยระบบเก็บสะสมพลังงาน

ในการดำเนินงานรถไฟการดำเนินงานเรื่องการประหยัดพลังงานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การออกแบบขบวนรถไฟให้เหมาะสมที่สุด เทคโนโลยีขั้นสูงของมอเตอร์ขับเคลื่อนระบบควบคุมการจัดการพลังงาน การบูรณาการระบบเก็บสะสมพลังงาน รวมทั้งการจัดเก็บและการนำกลับมาใช้ใหม่ของพลังงานคืนกลับจากการเบรกอย่างเหมาะสม ปัจจุบันระบบเบรกคืนพลังงานกลับเป็นที่นิยมใช้สำหรับรถไฟ เมื่อระบบเบรกคืนพลังงานกลับทำงานมอเตอร์ขับเคลื่อนจะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชั่วคราวซึ่งจะสร้างพลังงานและจ่ายย้อนกลับมาที่ระบบจ่าย พลังงานคืนกลับนี้สามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยวิธีต่อไปนี้

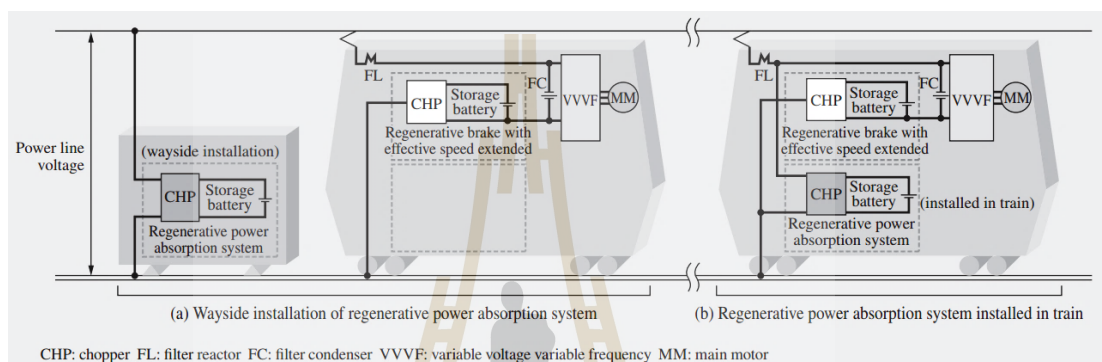
- ใช้เป็นพลังงานสำหรับรถไฟบริเวณใกล้เคียงที่ต้องการเร่งโดยใช้ตารางเวลาเหมาะสมที่สุดสำหรับสับเปลี่ยนพลังงานในกลุ่มรถไฟที่วิ่ง

- เก็บพลังงานและนำกลับไปใช้ใหม่โดยใช้ระบบเก็บสะสมพลังงาน

- จ่ายกลับไปในระบบไฟฟ้าหลักโดยสถานีไฟฟ้าแบบจ่ายย้อนกลับ (reversible substation or inverting substation)

ปกติลำดับความสำคัญแรกสำหรับการนำพลังงานคืนกลับไปใช้ คือ รถไฟที่บริเวณใกล้เคียงที่ต้องการเร่ง เมื่อปริมาณพลังงานเกินขีดความสามารถของระบบ พลังงานส่วนเกินนี้จะถูกทิ้งไปในรูปของความร้อนหรืออาจจะตัดระบบคืนกลับพลังงานออกเนื่องจากความก้าวหน้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและเทคโนโลยีเก็บสะสมพลังงาน การบูรณาการระบบเก็บสะสม

พลังงาน เช่น ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานและเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบรถไฟกลายเป็นตัวเลือกที่มีแนวโน้มมากในการจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรคอย่างมีประสิทธิภาพ พลังงานคืนกลับสามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่ง (Wayside or Trackside Energy Storage System: TESS) หรือระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ (On-Board Energy Storage System: OBESS) ดังภาพรวมการจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรคที่แสดงในรูปที่ 3.15 โดยจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.15 ภาพรวมการจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรค

ที่มาภาพ : (Shimada et al, 2010)

3.5 ระบบเก็บสะสมพลังงาน (Energy Storage Systems: ESSs)

ปัจจุบันความก้าวหน้าทีโคเด่นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและเทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานได้รับการยอมรับเป็นอย่างมาก และถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อวัตถุประสงค์ที่หลากหลายในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับการใช้งานในรถไฟไฟฟ้า ESSs มีประสิทธิภาพที่จะนำมาเพิ่มการดำเนินงานให้มีประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไปวัตถุประสงค์ของการใช้ ESSs ในการดำเนินงานรถไฟไฟฟ้านี้ 1) เพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ 2) เพื่อลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดระหว่างความเร็ว 3) เพื่อใช้กำลังไฟฟ้าจากรถไฟเป็นแหล่งจ่ายชั่วคราว 4) เพื่อใช้กำลังไฟฟ้าจากรถไฟเป็นแหล่งจ่ายหลัก ในมุมมองของการจัดการพลังงานในการดำเนินงานรถไฟ ESSs ควรจะลดการใช้พลังงานขับเคลื่อน โดยวิธีการจัดเก็บและนำพลังงานคืนกลับมาใช้ใหม่ และการเร่งในการดำเนินการกับทางรถไฟที่ไม่ใช้ไฟฟ้า (Masamichi, 2010) ESSs กลายเป็นตัวเลือกที่สำคัญในการจัดการพลังงานที่ได้จากการเบรคในรถไฟ (Gonzalez-Gil et al., 2014) ESSs สามารถติดตั้งได้ทั้งบนขบวนรถไฟ (on-board) หรือติดตั้งเฉพาะจุดตามทางวิ่ง (stationary or wayside) การเลือกเทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานสำหรับ ESSs ขึ้นอยู่กับความต้องการของแต่ละกรณี เช่น พิกัด

กำลังไฟฟ้าและพลังงาน เวลาการตอบสนอง น้ำหนัก ปริมาณ และอุณหภูมิทำงาน แต่โดยทั่วไปการนำมาใช้กับรถไฟฟ้าในเมืองจะพิจารณาให้มีคุณสมบัติดังนี้ คือ รอบอายุการใช้งานสูง พิกัดกำลังไฟฟ้าสูง พิกัดการจัดเก็บพลังงานระดับกลางถึงแม้ว่ามันอาจจะสูงสำหรับระบบบนขบวนรถ น้ำหนักและจำนวนที่ใช้ให้น้อยโดยเฉพาะสำหรับระบบบนขบวนรถ ปัจจุบันเทคโนโลยีหลักที่ตอบสนองความต้องการเหล่านี้คือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (EDLC) ตรงข้ามกับล้อช่วยแรง (flywheel) และแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน (lithium-ion) หรือ Ni-MH (Nickel metal hydride) (Vazquez et al., 2010)

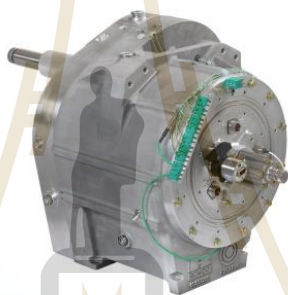
3.5.1 เทคโนโลยีของ ESSs สำหรับรถไฟฟ้า

1) แบตเตอรี่ (batteries) เป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานที่พบมากมีพื้นฐานมาจากการแปลงพลังงานเคมี คุณลักษณะพื้นฐานคือมีความหนาแน่นพลังงานสูงมากแต่มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่ำจึงนำไปสู่การใช้เวลาอัดประจุนาน แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (lead-acid) แบบทั่วไปมีการศึกษาและออกแบบมาเป็นระยะเวลานาน ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน (lithium-ion) และนิเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) เป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับระบบขนส่งเนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด มีการนำแบตเตอรี่ไปใช้งานอย่างกว้างขวางเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานในระบบขนส่งสาธารณะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถไฟฟ้า เช่น แทรม (tramways) และรถไฟฟ้าเมโทร (metro trains) มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาและพัฒนาการนำแบตเตอรี่ไปใช้งาน โดยการติดตั้งบนตัวรถไฟหรือติดตั้งอยู่กับที่ที่สถานีไฟฟ้า ซึ่งจากผลการตรวจสอบการทดสอบและการใช้งานจริงแสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่นั้นสามารถลดการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าและการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่สายจ่าย และยังช่วยให้รถไฟฟ้าวิ่งได้โดยไม่มีแหล่งจ่ายภายนอกในบางพื้นที่



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างการนำแบตเตอรี่ Li-ion ติดตั้งที่สถานี Hiraizumi เพื่อเก็บสะสมพลังงาน
ที่มาภาพ : <http://www.gsyuasa-lp.com/content/gs-yuasas-240kwh-lithium-ion-storage-battery-system-installed-hiraizumi-station-tohoku-line> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

2) ล้อช่วยแรง เป็นอุปกรณ์เชิงกลที่หมุนได้ ถูกใช้ในการเก็บสะสมพลังงานที่เกิดขึ้นจากการหมุน ล้อช่วยแรงมีโมเมนต์ความเฉื่อยอย่างมีนัยสำคัญซึ่งต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการหมุน ปริมาณของพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในล้อช่วยแรงเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความเร็วในการหมุน พลังงานจะถูกถ่ายโอนไปยังล้อช่วยแรงได้โดยการใส่แรงบิดซึ่งเป็นการเพิ่มความเร็วในการหมุนของล้อช่วยแรง และด้วยเหตุนี้จึงเป็นการเพิ่มการสะสมพลังงาน ในทางตรงกันข้าม ล้อช่วยแรงจะปลดปล่อยพลังงานที่เก็บไว้ได้โดยการให้แรงบิดต่อโหลดหรือภาระทางกลซึ่งเป็นการลดความเร็วในการหมุนของล้อช่วยแรงนั่นเอง ESSs ประเภทนี้มีกำลังไฟฟ้าสูง ความหนาแน่นพลังงานสูง จำนวนรอบการทำงานของการเก็บประจุและคายประจุแทบไม่มีที่สิ้นสุด แต่เนื่องจากการดำเนินงานเกี่ยวกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาอย่างมากเมื่อเทียบกับ ESSs ชนิดอื่น



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างล้อช่วยแรงสำหรับใช้งานกับรถไฟ

ที่มาภาพ : <http://rail.ricardo.com/en/Blogs/Articles/September-2015/Ricardo-flywheel-technology-could-lead-to-DMU-fuel> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

3) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือเรียกอีกชื่อว่า supercapacitor หรือ ultracapacitor เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก อุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูงกว่าตัวเก็บประจูนอื่น ๆ มากถึง 100-10000 เท่า อีกทั้งยังสามารถอัดประจุให้เต็มได้ภายในเวลาอันรวดเร็วเพียง 1-10 วินาที เทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน ซึ่งต้องใช้เวลาโดยเฉลี่ย 10-60 นาที และการคายประจุก็สามารถทำได้ภายในเวลา 1 วินาทีเช่นกัน จุดเด่นอีกประการของตัวเก็บประจุยิ่งยวด คือ เราสามารถที่จะอัดและคายประจุได้กว่า 500000 รอบ มากกว่าความสามารถของแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนถึง 100 เท่า และมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด 1000-10000 เท่า นอกจากนี้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังมีราคาต่อ kW ที่ต่ำ (US\$25-50/kW) (วรวิศ, 2556) และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แรงกระแทกและการสั่นสะเทือน ได้ดีอีกด้วย ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นเช่นนี้ รวมทั้งงานวิจัยและพัฒนาคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่กำลัง

ก้าวไปอย่างรวดเร็ว จึงทำให้อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าชนิดนี้ได้รับความสนใจอย่างมาก ด้านการประยุกต์ใช้งานสำหรับรถไฟฟ้า มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการเก็บพลังงานคืนกลับจากการเบรก ในการขนส่งสาธารณะ เมื่อรถต้องเบรกบ่อยครั้งและไม่สามารถนำพลังงานไฟฟ้าคืนกลับไปยังแหล่งจ่ายหรือรถขบวนอื่นที่วิ่งอยู่บริเวณใกล้เคียง ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถเก็บพลังงานคืนกลับจากการเบรกได้ มีงานวิจัยและการประยุกต์ใช้จำนวนมากที่มีการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากการตรวจสอบการทดสอบการใช้งานจริงในการให้บริการผู้โดยสาร หลักฐานการศึกษาตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถแสดงในรูปแบบของบทความทางวิชาการและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม สำหรับบทความวิชาการได้มีการเผยแพร่โดยนักวิจัยในสถาบันวิจัยสาธารณะและสถาบันการศึกษา ในทางกลับกันบริษัทที่ทำงานเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวดนำเสนอในรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า ทุกบริษัทได้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาโดยมีการตรวจสอบการทดสอบบนรถจริงเพื่อยืนยันสมรรถนะของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างที่มีการนำ EDLC modules ที่มีอยู่ในท้องตลาดไปใช้งาน ได้แก่ MITRAC Energy Saver ของบริษัท Bombardier Transportation, SITRAS SES ของบริษัท Siemens Transportation Systems และ Maximised Energy Efficiency Tramway System (STEEM) ของบริษัท Alstom Transport



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการนำ EDLC ไปใช้ในรถรางไฟฟ้า (Light Rail Vehicle: LRV)

ที่มาภาพ : <http://www.edn.com/electronics-blogs/powersource/4413126/Ultracapacitors-in-light-rail-regenerative-braking-system> [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.ย. 2560]

4) อุปกรณ์เก็บพลังงานด้วยแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด (Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES) ระบบการจัดเก็บพลังงานด้วยแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวดจะจัดเก็บพลังงานในสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้น โดยการไหลของกระแสตรงในขดลวดตัวนำยิ่งยวด (superconducting coil) ซึ่งมีพลังงานต่ำมากแต่ประสิทธิภาพและความหนาแน่นพลังงานสูง สำหรับการประยุกต์ใช้กับรถไฟฟ้า SMES มีการนำเสนอเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่สถานีไฟฟ้า เพราะความหนาแน่นพลังงานต่ำแต่ก็ไม่ได้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับเก็บพลังงานจากการเบรก ปัจจุบันยังไม่มีการนำมาใช้งานจริงกับรถไฟ ยังอยู่ในส่วนของงานวิจัย

การติดตั้ง ESSs ในระบบรถไฟฟ้าไม่ได้เป็นประเด็นใหม่แต่การเลือกที่ดีที่สุดให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการติดตั้งยังคงได้รับความสนใจ มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณาก่อนที่จะตัดสินใจ เช่น ชนิดของ ESSs ขนาดพิกัด วิธีการติดตั้งและค่าใช้จ่ายในการลงทุน ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของ ESSs อย่างไรก็ตามปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือค่าใช้จ่ายในการลงทุน ซึ่งควรจะประมาณการโดยใช้วิธีการประเมินทางเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน

Type	Energy efficiency (%)	Energy density (Wh/kg)	Power density (W/kg)	Cycle life (cycles)	Life time (years)	Discharge time	Suitable storage duration
Lead-Acid	70-80	10-35	25	200-2000	5-15	sec.-hours	min.-days
Li-ion	70-85	100-200	360	500-2000	5-15	sec.-hours	min.-days
Ni-MH	50-80	60-80	220	<3000	-	sec.-hours	min.-days
Flywheel	95	>50	5000	>20000	15	millisec-15 min.	sec.-min.
EDLC	95	<50	4000	>50000	>20	millisec-60 min.	sec.-hours
SMES	-	0.5-5	500-2000	>100000	>20	millisec-8 sec.	min.-hours

3.5.2 ระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ

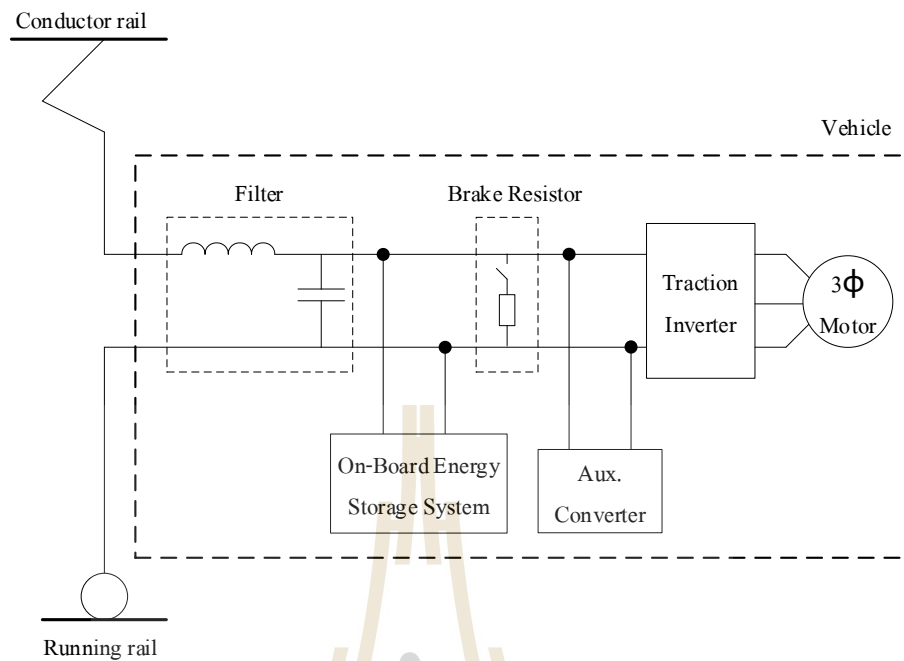
ระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถมีศักยภาพสูงในการประหยัดพลังงานสำหรับรถไฟฟ้าในเมือง จากการศึกษาทางวิทยาศาสตร์แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนอาจจะลดลงประมาณ 15% ถึง 35% ของระบบที่มีอยู่ (Barrero, Tackoen, and Mierlo, 2010; Domínguez et al., 2011; Chymera, Renfrew, and Barnes, 2008) นอกจากนี้ระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถอาจช่วยลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดในระหว่างที่รถไฟเร่งความเร็ว ซึ่งส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายของพลังงานและความต้านทานสูญเสียในสายจ่ายลดลง (Iannuzzi, and Tricoli, 2010) อีก

ที่นี้อาจจะออกแบบมาเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพแรงดันของระบบ (Cicarelli, Iannuzzi, and Tricoli, 2012) เมื่อเปรียบเทียบกับระบบติดตั้งอยู่กับที่ ระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถมีประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากไม่มีผลของความสูญเสียของสายส่ง ยิ่งไปกว่านั้นการจัดการพลังงานคืนกลับง่ายกว่าด้วยการควบคุมที่อิสระจากเงื่อนไขสภาพการจราจร อย่างไรก็ตามอุปกรณ์การเก็บพลังงานบนขบวนรถมักต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่บนตัวรถและทำให้ต้องพิจารณาการเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถแสดงดังตารางที่ 3.2 และแบบจำลองวงจรไฟฟ้าของรถไฟร่วมกับอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถแสดงดังรูปที่ 3.19

ตารางที่ 3.2 การประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ

Technology	Brand name	Company	Features	Applications in railway
EDLC	MITRAC	Bombardier	PC: 300 kW SC: 1 kWh W: 450 kg	Mannheim LRV (2003-2007); Rhein-Neckar-Verkehr GmbH tramway (2013)
	Sitras MES	Siemens	PC: 288 kW SC: 0.85 kWh W: 820 kg	Innsbruck tramway (2012)
	ACR	CAF	PC: N/A SC: 0.8 kWh W: 800 kg	Seville, Saragossa and Granada tramway systems
	STEEM	Alstom	PC: N/A SC: 0.8 kWh W: 800 kg	Prototype tests Paris tramway (2009-2010)
Flywheel	Citadis flywheel	Alstom&CCM	PC: 325 kW SC: 4 kWh W: 1600 kg	Prototype tests in Rotterdam (2004-2005)
Ni-MH	LRV Swimo	Kawasaki	PC: 250 kW SC: 120 kWh W: 3200 kg	Prototype tests in Sapporo Municipal Transport network (2007-2008)
Li-ion	LFX-300 streetcar	Kinki Shayro	PC: N/A SC: 40 kWh W: 3200 kg	Prototype tests in Charlotte (2010)

หมายเหตุ PC = Power capacity, SC = Storage capacity, W = Weight



รูปที่ 3.19 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าของรถไฟร่วมกับอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ

ตารางที่ 3.3 การประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่ง

Technology	Brand name	Company	Features	Applications in railway
EDLC	Sitras SES	Siemens	SV: 600/750 V PC: 700 kW SC: 2.5 kWh	Madrid and Cologne (2003); Beijing metro (2007); Toronto rail transit (2011)
	EnerGstor	Bombardier	SV: 600,750,1500 V PC: 650 kW SC: 1 kWh	N/A
	NeoGreen Power	Adeneo (Adetel)	SV: 750 V PC: 300-1000 kW SC: 1-4 kWh	Lyon tramway (2011)
	Envistore	Envitech Energy (ABB)	SV: 500-1850 V PC: 750-4500 kW SC: 0.8-16.5 kWh	Warsaw metro; Philadelphia transit system (2012)
	Capapost	Meidensha	SV: N/A PC: 2000 kW max SC: N/A	Hong Kong metro

ตารางที่ 3.3 การประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่ง (ต่อ)

Technology	Brand name	Company	Features	Applications in railway
Flywheel	Powerbridge	Piller Power Systems	SV: 400, 1000 V PC: 1000 kW SC: 5 kWh	Hannover and Rennes metro system (2004, 2010)
	GTR system	Kinetic Traction Systems	SV: 570-900 V PC: 200 kW SC: 1.5 kWh	London metro (2000); New York City transit system (2002); Lyon metro (2003-2004)
	Regen system	Vycon	SV: N/A PC: 500 kW SC: N/A	Los Angeles metro
Ni-MH	Gigacell BPS	Kawasaki	SV: 600, 1500 V PC: N/A SC: 150-400 kWh	New York City Transit network (2010); Osaka City Subway (2007)
Li-ion	B-CHOP	Hitachi	SV: 600/750, 1500 V PC: 500-2000 kW SC: N/A	Kobe transit system (2007)
	Intensium Max	Saft	SV: 700 V PC: 900-1500 kW SC: 600-400 kWh	Philadelphia transit system (2012)

หมายเหตุ SV = Supply voltage, PC = Power capacity, SC = Storage capacity

3.5.3 ระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่ง

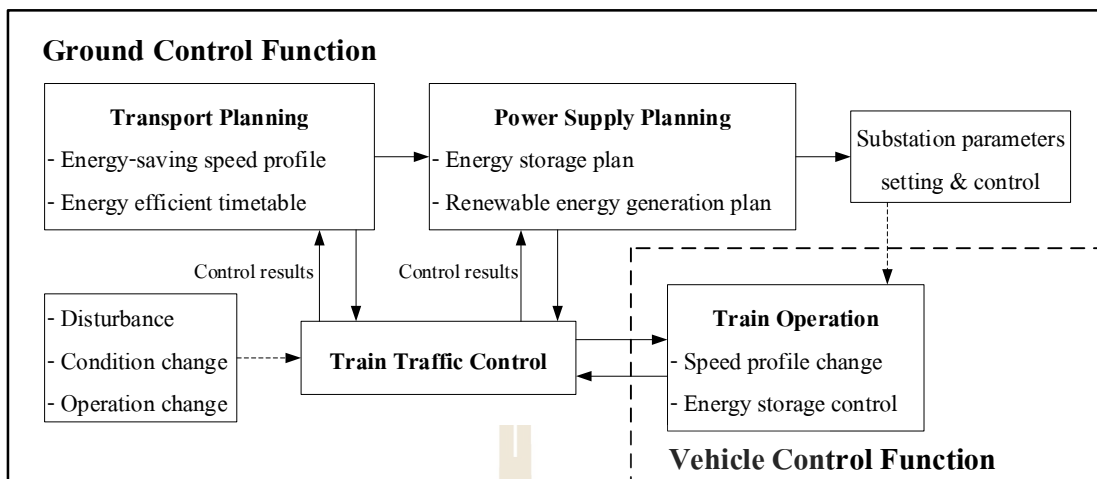
ระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่งเก็บพลังงานคืนกลับจากการเบรกที่ไม่สามารถใช้ได้ทันทีทันใดในระบบ และส่งกลับไปให้สายส่งเมื่อมีความต้องการพลังงานไฟฟ้า เช่น เมื่อขบวนรถไฟที่จะเร่งความเร็วในบริเวณใกล้เคียง พลังงานที่เก็บไว้ใน TESS สามารถช่วยตัดกำลังไฟฟ้าค่ายอดในช่วงที่รถไฟกำลังเร่งความเร็วและอาจจะเป็นแหล่งจ่ายไฟให้รถไฟชั่วคราวในกรณีที่แหล่งจ่ายจากระบบไฟฟ้าหลักขัดข้อง ดังนั้นระบบชนิดนี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้การจัดการการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพแต่ยังเพิ่มความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของระบบได้อีกด้วย นอกจากนี้การบำรุงรักษาระบบจะไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานให้บริการ (Gonzalez-Gil et al., 2014) ในทางตรงกันข้ามการจัดการพลังงานของระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่งขึ้นอยู่กับ การควบคุมการจราจรและพลังงานสูญเสียในสายส่งจะสูงมากเมื่อระยะทางจากรถไฟไปยัง TESS เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.3 แสดงชนิดของ ESS ที่นำไปใช้ในทางปฏิบัติที่นำไปติดตั้งริมทางวิ่ง EDLC เป็นชนิดที่นิยมในเชิงพาณิชย์มากที่สุด และตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานริมทางวิ่งควรจะเป็นพื้นที่ที่ระบบสามารถใช้พลังงานคืนกลับในปริมาณที่น้อยกว่าพื้นที่อื่น

3.6 การจัดการพลังงานในระบบรถไฟฟ้า

การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซ CO₂ เป็นแนวโน้มที่สำคัญในระบบขนส่ง เนื่องจากความไม่แน่นอนของการใช้กำลังไฟฟ้าและพลังงานในระบบรถไฟฟ้า การจัดการพลังงานเป็นประเด็นที่สำคัญที่นักวิจัยส่วนใหญ่ ระบบการจัดการพลังงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการดำเนินการควบคุมการเดินรถไฟฟ้าภายใต้การวางแผนการใช้พลังงาน อย่างไรก็ตามระบบการจัดการพลังงานต้องมีการดำเนินงานร่วมกันหลายฟังก์ชันและหลายองค์ประกอบจึงทำให้ระบบการจัดการพลังงานนั้นเป็นระบบที่ซับซ้อน การเพิ่มขีดความสามารถของการจัดการพลังงาน อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ล้อเลื่อน ตัวเก็บประจุยิ่งยวด เป็นต้น สามารถนำมาบูรณาการในระบบรถไฟฟ้าในรูปแบบติดตั้งบนขบวนรถและรูปแบบติดตั้งข้างทาง เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในปัจจุบันทำให้อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานมีความยืดหยุ่นและความเชื่อถือได้มากขึ้น แต่ค่าใช้จ่ายที่ต้องคำนึงของ ESS และระบบควบคุม เป็นเงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการพิจารณาเมื่อนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริง

ในระบบรถไฟฟ้าการประหยัดพลังงานเป็นประเด็นที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับระบบย่อยหลายส่วน เช่น ระบบจ่ายไฟ ขบวนรถไฟ การจัดการเดินรถ และหน่วยงานที่รับผิดชอบการเดินรถ ผู้ดูแลระบบพยายามที่จะหาวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกำลังไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในระบบ แต่มีหลายเงื่อนไขและปัจจัยที่ต้องพิจารณา ด้วยเหตุนี้เองระบบการจัดการพลังงานในรถไฟฟ้า จึงได้รับการพัฒนาโดยมีเป้าหมายที่จะบูรณาการดำเนินการและควบคุมการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมงานหลักของการจัดการพลังงานในรถไฟฟ้าคือการวางแผนการใช้พลังงานและการควบคุมทั้งการดำเนินการและแหล่งจ่ายไฟของรถไฟฟ้าให้ได้ตามแผน นอกจากนี้ยังคำนึงถึงการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพของพลังงานคืนกลับและพลังงานหมุนเวียน



รูปที่ 3.20 ระบบการจัดการพลังงานในรถไฟ

รูปที่ 3.20 แสดงให้เห็นถึงระบบการจัดการพลังงานในรถไฟ มี 2 ฟังก์ชันหลัก คือ ฟังก์ชันการควบคุมภาคพื้นดิน (ground control function) และฟังก์ชันการควบคุมรถไฟ (vehicle control function) ในด้านภาคพื้นดิน ฟังก์ชันการควบคุมภาคพื้นดินนี้มีหน้าที่รับผิดชอบการจัดการระบบโดยรวมร่วมกับฟังก์ชันการวางแผนการขนส่ง (transport planning function) ฟังก์ชันการวางแผนการจ่ายไฟ (power supply planning function) และฟังก์ชันการควบคุมการเดินรถ (train traffic control function) ส่วนด้านรถไฟ ฟังก์ชันการควบคุมรถไฟมีหน้าที่รับผิดชอบการควบคุมรถไฟและระบบบนขบวนรถบนพื้นฐานข้อมูลจากการควบคุมการเดินรถและสถานีไฟฟ้า เพื่อกำหนดการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพของพลังงานจากระบบไฟฟ้า พลังงานคืนกลับจากการเบรกและแหล่งพลังงานหมุนเวียน อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานสามารถนำไปใช้กับระบบรถไฟโดยการติดตั้งบนขบวนรถหรือติดตั้งริมทางวิ่ง (Miyoshi, Takeba, and Miyatake, 2012)

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 5 หัวข้อหลัก ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบรถไฟ ระบบรถไฟกระแสตรงขนส่งมวลชน พลังงานคืนกลับจากการเบรก ระบบเก็บสะสมพลังงานและการจัดการพลังงานในระบบรถไฟ

บทที่ 4

แบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน

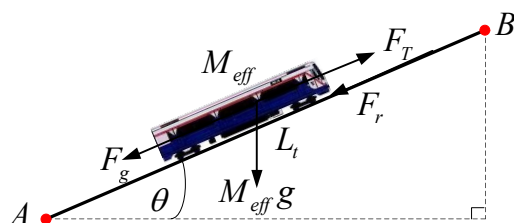
4.1 บทนำ

การวางแผนการจัดการด้านการประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้า มีวิธีที่ช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้หลากหลายวิธี เช่น กลยุทธ์ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าตามข้อมูลความเร็วของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด การใช้พลังงานคืนกลับจากการเบรกมาจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนเพื่อช่วยลดกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายจากแหล่งจ่ายภายนอก การใช้ระบบเก็บสะสมพลังงาน การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เป็นต้น ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ส่งผลที่ซับซ้อนต่อการวางแผน การออกแบบและการจัดการ ปัจจุบัน คอมพิวเตอร์มีสมรรถนะในการประมวลผลที่สูงขึ้นกว่าแต่ก่อนมาก มีซอฟต์แวร์ที่สามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรมช่วยในการออกแบบวางแผนและวิเคราะห์มากมาย การพัฒนาการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณผ่านการสร้างแบบจำลองของระบบในภาพรวมช่วยให้ผู้ออกแบบวางแผนระบบได้ตามสภาพการจราจรที่ใช้งานจริงหรือตามแผนที่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า ในบทนี้ได้นำเสนอขั้นตอนการสร้างแบบจำลองระบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองและลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า และแบบจำลองระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้ากระแสตรง อีกทั้งในหัวข้อสุดท้ายได้นำเสนอการทดสอบและประเมินความถูกต้องของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2 แบบจำลองและลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การจ่ายพลังงานให้กับขบวนรถไฟฟ้าเพื่อใช้เร่งให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นไปตามรางวิ่ง โดยที่การเคลื่อนที่เชิงเส้นของขบวนรถไฟฟ้า นั้นเป็นผลมาจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ใช้สร้างแรงบิด ไปขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ถ้าการจ่ายพลังงานมากพอที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ แรงลัพธ์ที่เหลือจะกระทำกับขบวนรถเพื่อเร่งให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร่งได้ การคำนวณทางพลวัตของรถไฟฟ้า (train vehicle dynamic) เริ่มต้นจากแผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของหัวรถจักรไฟฟ้าที่มีค่าประสิทธิผลของน้ำหนักขบวนรถไฟฟ้า (effective vehicle mass: M_{eff}) ดังรูปที่ 4.1 รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปบนรางวิ่ง เพื่อให้การวิเคราะห์อยู่ในรูปทั่วไปรางวิ่งจะถูก

ยกให้เอียงทำมุมกับแนวราบ ส่งผลให้แรงโน้มถ่วงมีผลต่อการเคลื่อนที่นี้ด้วย อาจจะช่วยเสริมการเคลื่อนที่หรือต้านการเคลื่อนที่ก็ได้



รูปที่ 4.1 แผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของรถไฟ

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้รถไฟกำลังเคลื่อนที่ไปตามรางวิ่งที่เอียงทำมุม θ กับแนวระดับ ด้วยความเร่ง α แรงกระทำที่เกี่ยวข้อง คือ แรงฉุดของหัวรถจักร (tractive effort: F_T) และแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟโดยรวม (overall resistance force: R) ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟประกอบด้วยแรงต้านทานการวิ่ง (running resistance force: F_r) แรงต้านทานเกรเดียนต์ (gradient resistance force: F_g) และแรงต้านทานทางโค้ง (curve resistance force: F_c) ดังนั้นสมการพื้นฐานการเคลื่อนที่ของรถไฟพิจารณาด้วยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Second Law) ดังสมการที่ (4.1)

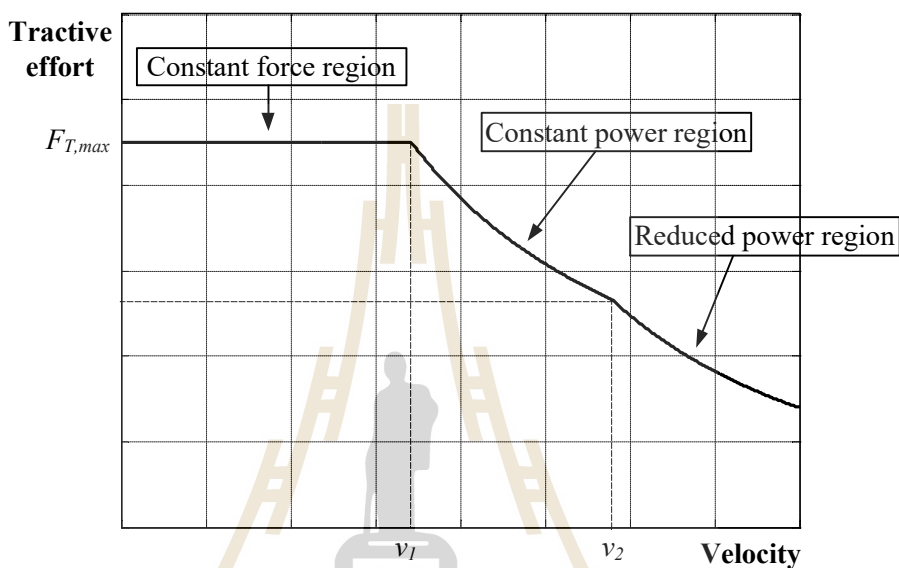
$$F = F_T - R = M_{eff} \alpha \quad (4.1)$$

$$R = F_r + F_g + F_c \quad (4.2)$$

แรงฉุดของหัวรถจักร

ลักษณะของแรงฉุดของหัวรถจักรแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ซึ่งแรงฉุดนี้เกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ส่งกำลังผ่านระบบเฟืองทดเพื่อไปขับล้อ แรงฉุดผลลัพธ์ในรูปที่ 4.2 ผ่านการปรับจูนอัตราทดมาแล้ว ทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้คำนวณการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟได้ กราฟแรงฉุดของขบวนรถไฟมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) จะแปรผันตามความเร็วในการเคลื่อนที่เชิงเส้นของขบวนรถไฟในหน่วย m/s หรือ km/h โดยไม่สนใจเทคโนโลยีมอเตอร์ขับเคลื่อนและอินเวอร์เตอร์ที่ใช้บนขบวนรถไฟ รวมทั้งเทคโนโลยีการจ่ายไฟกระแสตรงหรือกระแสสลับ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลลัพธ์ในรูปตัวปรับจูนเพื่อแปลงค่ามาเป็นลักษณะสมบัติของแรงฉุด หัวรถจักรไฟฟ้าจะมีลักษณะสมบัติ

แรงฉุดกับความเร็วยที่แตกต่างกันขึ้นกับเทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนและการจ่ายไฟฟ้า ตามนิยามเส้นกราฟแรงฉุดหัวรถจักรมาตรฐานของ UIC ตัวแปรความเร็วฐาน (base speed: v_1) เป็นความเร็วสุดท้ายที่หัวรถจักรจะให้แรงฉุดคงที่ที่ค่าสูงสุด เมื่อความเร็วของหัวรถจักรมากกว่าค่าความเร็วฐานแรงฉุดจะลดลง แต่การทำงานจะเปลี่ยนจากแรงฉุดคงที่ (constant force region) เป็นกำลังงานคงที่ (constant power region)



รูปที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของแรงฉุดของหัวรถจักร

แรงต้านทานการวิ่ง

การเคลื่อนที่ของรถไฟจะมีแรงต้านซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อกับรางและแรงต้านอากาศ ผู้ผลิตหัวรถจักรนิยมระบุค่าแรงเสียดทานต้านการเคลื่อนที่รวมกับแรงต้านอากาศ ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะเฉพาะของขบวนรถที่ไม่ขึ้นกับเส้นทางเดินรถ เรียกโดยรวมว่า แรงต้านทานการวิ่งของขบวนรถไฟ สามารถคำนวณได้จากสมการกำลังสอง (quadratic equation) หรือเรียกว่า สมการเดวี (Davis equation) ดังจากสมการที่ (4.3) (Lu, 2011)

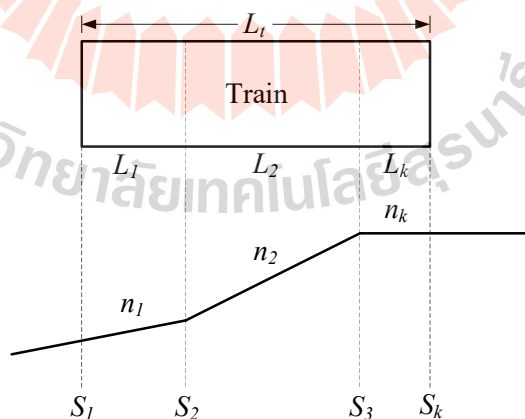
$$F_r = A + Bv + Cv^2 \quad (4.3)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h) และ A (kN), B (kNh/km) และ C (kNh²/km²) คือ สัมประสิทธิ์เดวี (Davis coefficients) ซึ่งทุกตัวเป็นค่าคงที่ (Rochard, and Schmid, 2000) สมการนี้พัฒนาขึ้นโดย von Borries Formel, Leitzmann Formel, Barbier และ Davis สมการนี้ได้จากการทำ curve fitting จากข้อมูลทดสอบของระบบรถไฟ การรถไฟประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกได้พัฒนา

สมการเดวีเพื่อนำมาใช้คำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับการให้บริการเดินรถของประเทศนั้น ๆ

แรงต้านทานเกรเดียนต์

การลากขบวนรถไฟซึ่งมีน้ำหนักมากขึ้นเนินนั้นต้องใช้แรงลากอย่างมาก โดยทั่วไปเส้นทางการเดินรถไฟขบวนรถระดับเกรเดียนต์หรือความชันจะน้อย และจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความชันบ่อย (Lu, 2011) การพิจารณาแรงต้านทานเกรเดียนต์จำเป็นต้องคำนึงรูปแบบของขบวนรถไป ปกติแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟอย่างง่ายจะจำลองโดยสมมติให้ขบวนรถไฟเป็นจุดมวล (mass point) แต่เพื่อให้ใกล้เคียงความเป็นจริงควรพิจารณาขบวนรถไฟในรูปแบบแผ่นยาว ๆ เนื้อเดียวกัน น้ำหนักกระจายเท่า ๆ กันตลอดทั้งขบวน ดังนั้นความต้านทานเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของเส้นทางระหว่างช่วงสองช่วงที่อยู่ติดกันจะมีค่าไม่เท่ากัน พิจารณาขบวนรถไฟแบบ Homogeneous strip ดังรูปที่ 4.3 กำหนดให้รถไฟมีความยาวครอบคลุมจำนวน k ช่วง ระยะของแต่ละช่วงแทนด้วย S_1, \dots, S_k ซึ่งแต่ละช่วงมีความชันเป็น n_k มวลของรถไฟกระจายเท่า ๆ กันตลอดช่วงระยะ S_k ความยาวของขบวนรถไฟแทนด้วย L_i ความยาวของส่วนของรถไฟเทียบกับช่วง S_k แทนด้วย L_k โดยผลรวมของ $L_1 + \dots + L_k$ มีค่าเท่ากับ L_i แรงต้านทานเกรเดียนต์หรือแรงต้านเนื่องจากความลาดเอียงของการเคลื่อนที่ สามารถหาได้ดังสมการที่ (4.4) โดยที่ m_k เป็นมวลของส่วนของขบวนรถไฟที่ครอบคลุมระยะทาง S_k



รูปที่ 4.3 การพิจารณาขบวนรถไฟแบบ Homogeneous strip

$$F_g = gm_1n_1 + gm_2n_2 + \dots + gm_kn_k \quad (4.4)$$

$$m_k = M_{eff} (L_k / L_t) \quad (4.5)$$

แรงต้านทานทางโค้ง

แรงต้านทานทางโค้งเป็นส่วนหนึ่งของแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถไฟ นั่นก็คือแรงต้านทานเพิ่มเติมจากการหมุนของล้อรถไฟที่รถไฟจะต้องเอาชนะเมื่อต้องวิ่งในส่วนของทางโค้ง บนทางวิ่ง แรงต้านนี้จะขึ้นอยู่กับรัศมีทางโค้งของทางวิ่ง $r(s)$ แรงต้านทานทางโค้งสามารถหาได้จาก Roeckl's formula ดังสมการที่ (4.6) (Nash, and Huerlimann, 2003).

$$F_c = \begin{cases} \frac{6.3}{r(s) - 55} M_{eff} & ; \text{for } r(s) \geq 300 \text{ m} \\ \frac{4.91}{r(s) - 30} M_{eff} & ; \text{for } r(s) < 300 \text{ m} \end{cases} \quad (4.6)$$

ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟ

แรงเนื่องจากการหมุนของล้อไฟนั้นจะต้องถูกนำมาคำนวณเพื่อหาความเร่งของรถไฟ ซึ่งปกติมักจะทำการเพิ่มตัวประกอบการหมุน (rotary allowance) หรือตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร (passenger mass factor) เข้าไปในการคำนวณค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟด้วย ซึ่งค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟสามารถหาได้จากสมการที่ (4.7) (Lu, 2011)

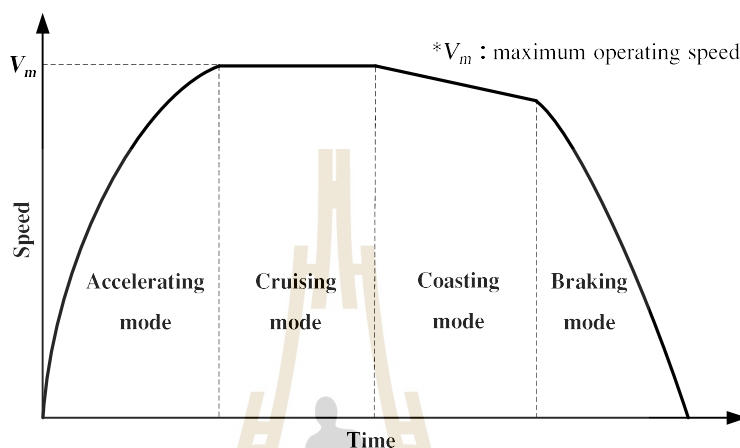
$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) + M_l \quad (4.7)$$

โดยที่ M_t คือ น้ำหนักเปล่า (tare weight) λ_w คือ rotary allowance และ M_l คือ น้ำหนักของผู้โดยสาร (passenger load)

4.2.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การเคลื่อนที่ของรถไฟเพื่อรับส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสารสองสถานี นั้นจะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ตามลักษณะสมบัติเส้นโค้งความเร็ว-เวลา (train's speed-time curve) โหมดการทำงานพื้นฐานของรถไฟจะเคลื่อนที่ภายใต้โหมดการทำงาน 4 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (acceleration mode) โหมดความเร็วคงที่ (constant speed or cruising mode) โหมดแล่นด้วยความเฉื่อย (coasting mode) และ โหมดการเบรก (braking mode) (Kulworawanichpong, 2003; Kim, 2010) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยแรงฉุดขบวนรถไฟในแต่ละโหมดขึ้นอยู่กับเทคนิคการ

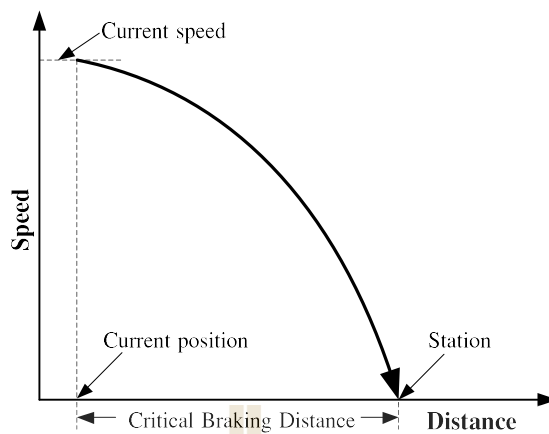
ควบคุมที่ใช้ (Sumpavakup and Kulworawanichpong, 2014) อย่างไรก็ตาม การทำงานของรถไฟ อาจจะมีการสลับ โหมดทำงานไปมาได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ(Bocharnikov et al., 2007) เช่น หากต้องการประหยัดพลังงานอาจจะใช้การควบคุมด้วย coasting mode สลับกับ accelerating mode เพื่อให้ใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด เป็นต้น



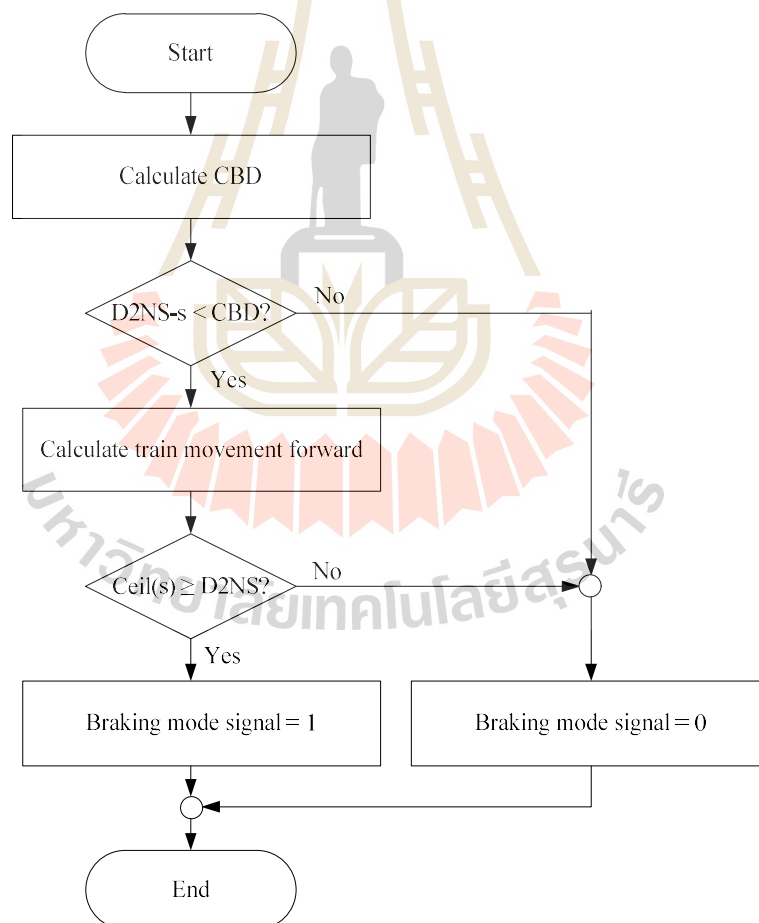
รูปที่ 4.4 โหมดการทำงานขงรถไฟฟ้า

โหมดเร่งความเร็วจะเริ่มเร่งความเร็วออกจากสถานีด้วยความเร่งที่กำหนดจนถึงที่ ความเร็วทำงาน (service speed) โดยค่าความเร่งขงรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวก (α_{acc}) และแรงฉุด ขบวนรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4.1) เมื่อความเร็วขงรถไฟฟ้าถึงความเร็วทำงานก็ จะเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่ โหมดนี้จะรักษาความเร็วไว้ที่ความเร็วทำงาน ($\alpha=0$) จนกระทั่งถึง ตำแหน่งเริ่มโหมดการแล่น เมื่อถึงโหมดการแล่นด้วยความเฉื่อย โหมดนี้แรงฉุดขบวนรถไฟฟ้าจะมี ค่าเป็นศูนย์ ($F_T=0$) และค่าความเร่งจะมีค่าเป็นลบ แต่อย่างไรก็ตามความเร่งสามารถมีค่าเป็นบวกได้ ในกรณีที่ลงเนินลาดชัน และจะเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรกก็ต่อเมื่อถึงความเร็วที่ต้องเบรกด้วย ความเร่งเป็นลบ (α_{dec}) หรือถึงระยะที่จะต้องเบรก เรียกว่า ระยะวิกฤตการเบรก (Critical Braking Distance: CBD) เพื่อจะเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยค่า CBD สามารถหาได้ จากสมการที่ (4.8) (Lu, 2011) แต่เพื่อให้การจอดที่สถานีผู้โดยสารมีความแม่นยำเมื่อพิจารณาผล ขงความชันและความโค้งขงเส้นทางวิ่งก่อนถึงสถานีผู้โดยสาร จำเป็นต้องตรวจสอบระยะเบรก อีกครั้งก่อนจะเข้าสู่โหมดเบรก โดยการคำนวณการเคลื่อนที่ขงรถไฟไปข้างหน้า เพื่อหาระยะเริ่ม เบรกที่แม่นยำ การควบคุมการทำงานขงโหมดการเบรกแสดงดังรูปที่ 4.6

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha_{dec}} \quad (4.8)$$



รูปที่ 4.5 แผนภาพการคำนวณระยะวิกฤตการเบรก



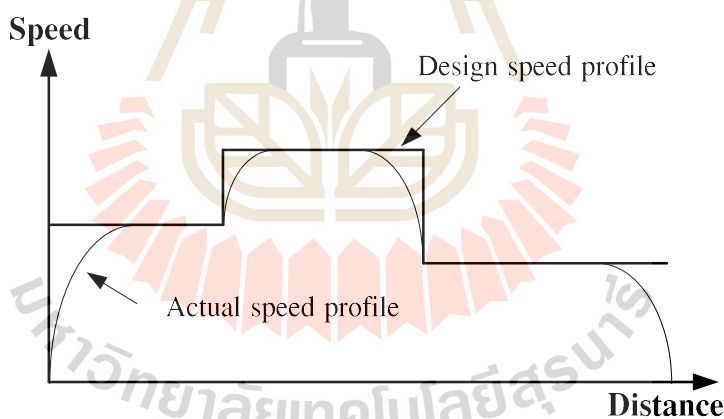
รูปที่ 4.6 การควบคุมการทำงานของโหมดการเบรก

ในงานวิจัยนี้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟจะเป็นการสร้างการเคลื่อนที่ของรถไฟหรือการสร้างเส้นโครงร่างความเร็ว (speed profile) ให้วิ่งตามเส้นร่างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ (design speed profile) แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยใช้หลักการควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control) ซึ่งจะเป็นการคำนวณค่าความเร่งจากค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วจริงของรถไฟกับความเร็วอ้างอิง ดังรูปที่ 4.8 การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟจะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 โหมด ได้แก่ โหมดวิ่ง (running mode) โหมดเบรก (braking) และโหมดหยุดที่สถานี (station stop mode) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

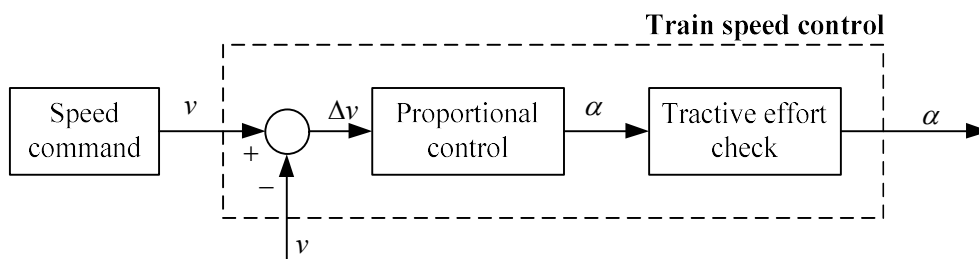
1) โหมดวิ่ง ทำหน้าที่เริ่มต้นในการคำนวณและใช้สำหรับการควบคุมความเร็วขณะที่รถเคลื่อนที่ โดยการควบคุมความเร็วในโหมดนี้แบ่งเป็น 2 เงื่อนไข คือ เมื่อความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ให้รถไฟเข้าสู่โหมดเร่งความเร็ว แต่ถ้าความเร็วสูงกว่าความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ให้รถไฟเข้าสู่โหมดควบคุมความเร็วคงที่

2) โหมดเบรก ทำหน้าที่ลดความเร็วของรถไฟเพื่อเข้าจอดที่สถานี

3) โหมดหยุดที่สถานี ทำหน้าที่นับเวลาหยุดที่สถานีให้ครบตาม dwell time



รูปที่ 4.7 การสร้างเส้นโครงร่างความเร็ว



รูปที่ 4.8 การควบคุมความเร็วแบบสัดส่วนสำหรับการควบคุมความเร็วรถไฟ

4.2.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า (train power consumption: P_{tr}) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ กำลังไฟฟ้าลากจูง (tractive power: P_{ta}) กำลังไฟฟ้าจากระบบเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าบนขบวนรถ (ESS power: P_{ESS}) และกำลังไฟฟ้าเสริม (auxiliary power: P_{aux}) ที่เกิดจากระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ ระบบสัญญาณ และอื่น ๆ ดังสมการที่ (4.9) โดยที่กำลังไฟฟ้าลากจูงจะขึ้นกับค่าแรงจูงขบวนรถไฟฟ้า (F_T) ความเร็วของรถไฟและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ลากจูง (η) ดังสมการที่ (4.10) และ P_{ESS} จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ประจุของระบบเก็บสะสมพลังงาน (ESS charge power: P_{charge}) ก็ต่อเมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถและอยู่ในโหมดประจุไฟฟ้า (charging mode) และ จะมีค่าเท่ากับลบกำลังไฟฟ้าที่คายประจุของระบบเก็บสะสมพลังงาน (ESS discharging power: P_{dis}) ก็ต่อเมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถและอยู่ในโหมดคายประจุไฟฟ้า (discharging mode) และจะมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ได้ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ ดังสมการที่ (4.11) ซึ่งการหาค่า P_{charge} และ P_{dis} จะนำเสนอรายละเอียดในบทถัดไป

$$P_{tr} = P_{ta} + P_{ESS} + P_{aux} \quad (4.9)$$

$$P_{ta} = \begin{cases} \frac{F_T}{\eta} \times v & ; \text{if } F_T \geq 0 \\ \eta F_T \times v & ; \text{if } F_T < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

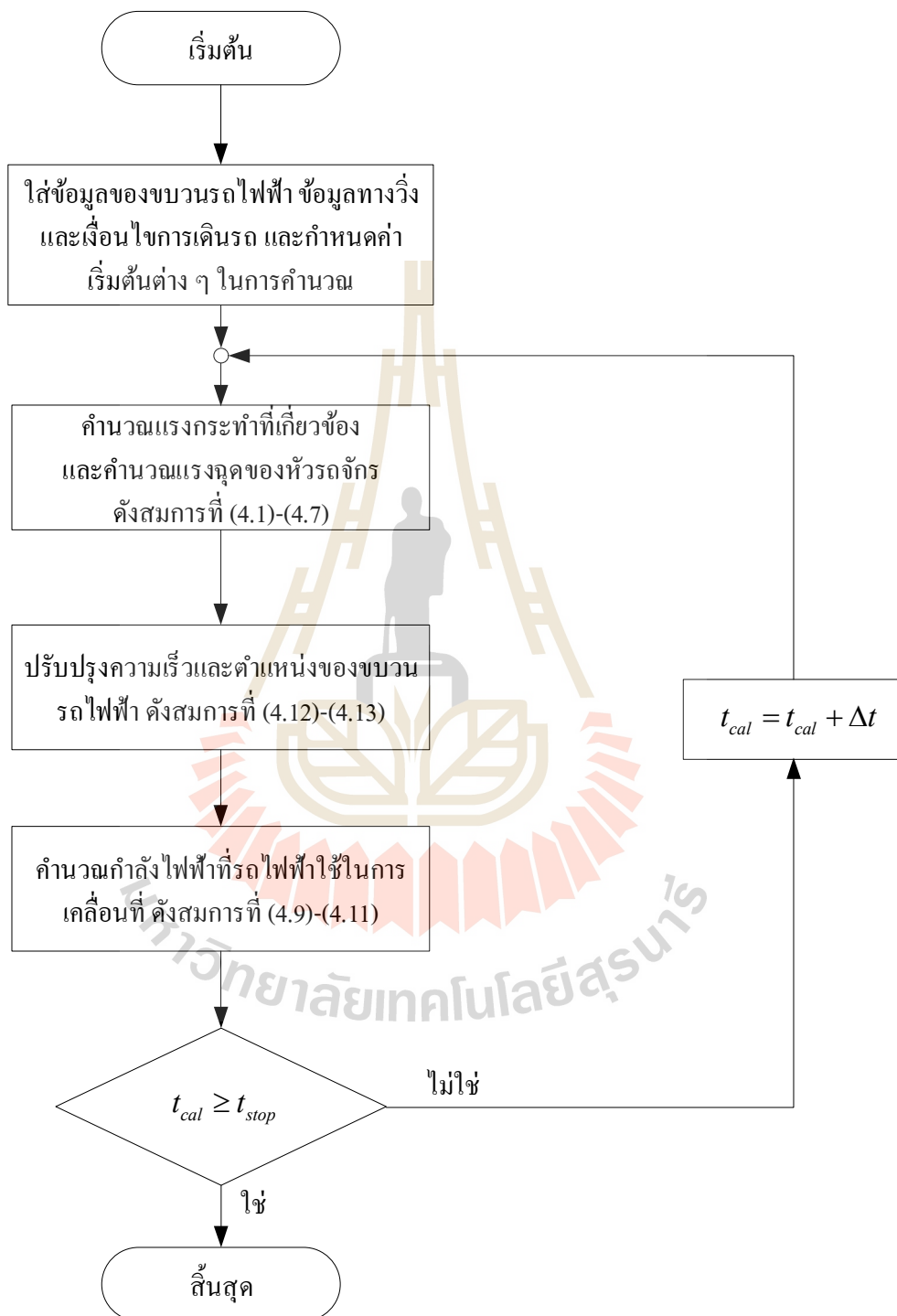
$$P_{ESS} = \begin{cases} P_{charge} & ; \text{if with the ESS and charging mode} \\ -P_{dis} & ; \text{if with the ESS and discharging mode} \\ 0 & ; \text{if without the ESS} \end{cases} \quad (4.11)$$

4.2.3 การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่

การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.12) และ (4.13) ตามลำดับ โดยที่ v_t และ v_i คือ ความเร็วรถไฟหลังและก่อนปรับปรุง Δt คือ time step s_t และ s_i คือ ตำแหน่งรถไฟหลังและก่อนปรับปรุง

$$v_t = v_i + \alpha \Delta t \quad (4.12)$$

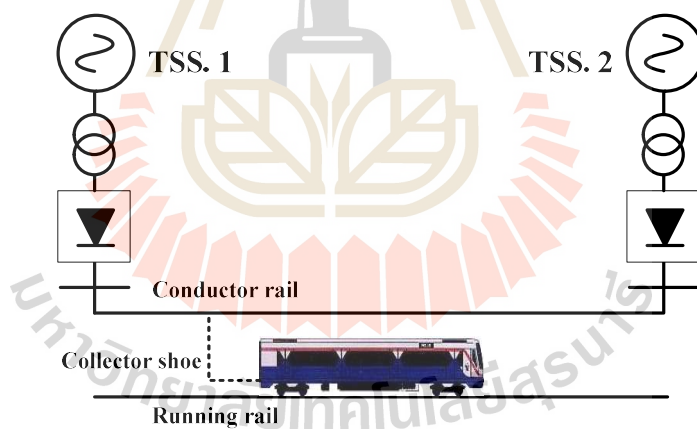
$$s_t = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \tag{4.13}$$



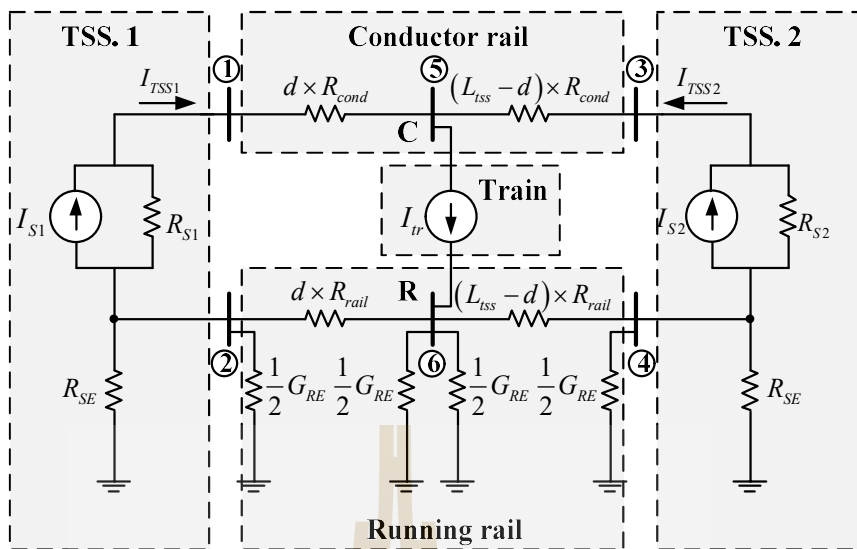
รูปที่ 4.9 สรุปขั้นตอนการคำนวณลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

4.3 แบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากระแสตรง

แรงดันมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเป็น 600 V หรือ 750 V สำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง ใช้ระดับแรงดัน 1500 V สำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงชานเมือง และใช้ระดับแรงดัน 3000 V สำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างเมือง หรือระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง การจ่ายไฟด้วยรางที่สามจะใช้ในกรณีของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีแรงดันพิกัดไม่เกิน 750 V และมีความเร็วในการให้บริการไม่สูงมากนัก เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1500 V และ 3000 V จะนำรูปแบบการจ่ายไฟผ่านสายส่งเหนือศีรษะมาใช้งาน การใช้รางที่สามจะไม่เหมาะสมเนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวนำของรางที่สามกับรางวิ่งใกล้กันเกินไป ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการทำฉนวนไฟฟ้า การจ่ายด้วยรางที่สามจึงเหมาะกับระบบที่มีพื้นที่จำกัด เช่น ระบบรถไฟฟ้าใต้ดินในอุโมงค์ เป็นต้น การจ่ายไฟจะใช้การแปลงไฟจากสถานีเรียงกระแส (rectifier substation) ระบบไฟฟ้ากระแสลับที่เชื่อมต่อจะขึ้นอยู่กับกริดไฟฟ้าของท้องถิ่นว่าจะมีระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันเท่าใด เช่น ระบบรถไฟฟ้า BTS และ MRT ของประเทศไทยใช้ระดับแรงดันไฟฟ้า 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวง เป็นต้น



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างแผนภาพจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน



รูปที่ 4.11 วงจรสมมูลระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน

การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนดังรูปที่ 4.10 ดำเนินการได้โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธี โหนด (node analysis) ดังในรูปที่ 4.11 จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction substation) ส่วนสายป้อน (feeder) ซึ่งประกอบด้วยรางตัวนำและรางวิ่ง และส่วนรถไฟฟ้า (train) โดยทั้งสามส่วนนี้จะพิจารณาการคำนวณแรงดันรางด้วย และกำหนดให้มีรถไฟฟ้าวิ่งอยู่บนรางขาไปหรือขาขึ้น (up-track) หนึ่งขบวน ใช้แบบจำลองโหลดครดไฟฟ้าในรูปของกระแส จะได้สมการโหนดเพื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดต่าง ๆ ดังสมการที่ (4.14)

$$[V] = [G]^{-1} [I] \tag{4.14}$$

ซึ่ง $[G]$ และ $[I]$ สามารถหาได้ดังนี้

$$[G] = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{d \times R_{cond}} & -\frac{1}{R_{S1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_{S1}} & \frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_{SE}} + \frac{1}{d \times R_{rail}} + \frac{G_{RE}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{S2}} + \frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{cond}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{S2}} & \frac{1}{R_{S2}} + \frac{1}{R_{SE}} + \frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{rail}} + \frac{G_{RE}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{d \times R_{cond}} & 0 & -\frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{cond}} & 0 & 0 & \frac{1}{d \times R_{cond}} + \frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{cond}} \\ 0 & -\frac{1}{d \times R_{rail}} & 0 & -\frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{rail}} & 0 & \frac{1}{d \times R_{rail}} + \frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{rail}} + G_{RE} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{d \times R} & 0 \\ 0 & \frac{1}{d \times R} \\ -\frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{cond}} & -\frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{rail}} \\ 0 & -\frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{rail}} \\ \frac{1}{d \times R_{cond}} + \frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{cond}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{d \times R_{rail}} + \frac{1}{(L_{tss}-d) \times R_{rail}} + G_{RE} \end{bmatrix}$$

$$[I] = [I_{TSS1} \quad -I_{TSS1} \quad I_{TSS2} \quad -I_{TSS2} \quad -I_{tr} \quad I_{tr}]^T$$

โดยที่ d คือ ตำแหน่งที่ขบวนรถไฟอยู่บนรางวิ่ง (m)

L_{tss} คือ ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (m)

R_{cond} คือ ค่าความต้านทานรางตัวนำ (conductor rail resistance) (Ω /m)

R_{rail} คือ ค่าความต้านทานรางวิ่ง (running rail resistance) (Ω /m)

R_S คือ ค่าความต้านทานลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (substation short-circuit resistance) (Ω)

I_{TSS} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟ (substation current) (A)

I_{tr} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของรถไฟ (A)

R_{SE} คือ ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction substation ground resistance) (Ω)

G_{RE} คือ ค่าความนำไฟฟ้าของรางเทียบกับดิน (rail-to-earth conductance) (S/m)

ค่า R_S สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.15) และค่า I_{TSS} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.16) ซึ่ง V_{nl_tss} คือ ค่าแรงดันไร้โหลดที่สถานีจ่ายไฟ (no-load substation voltage) P_{SC} คือ ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าจริงลัดวงจรที่สถานีจ่ายไฟ (substation short-circuit capacity) และค่า I_S คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีจ่ายไฟ (substation short-circuit current) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.17)

$$R_S = \frac{(V_{nl_tss})^2}{P_{SC}} \quad (4.15)$$

$$I_{TSS} = I_S - \frac{V_S}{R_S} \quad (4.16)$$

$$I_S = \frac{P_{SC}}{V_{nl_tss}} \quad (4.17)$$

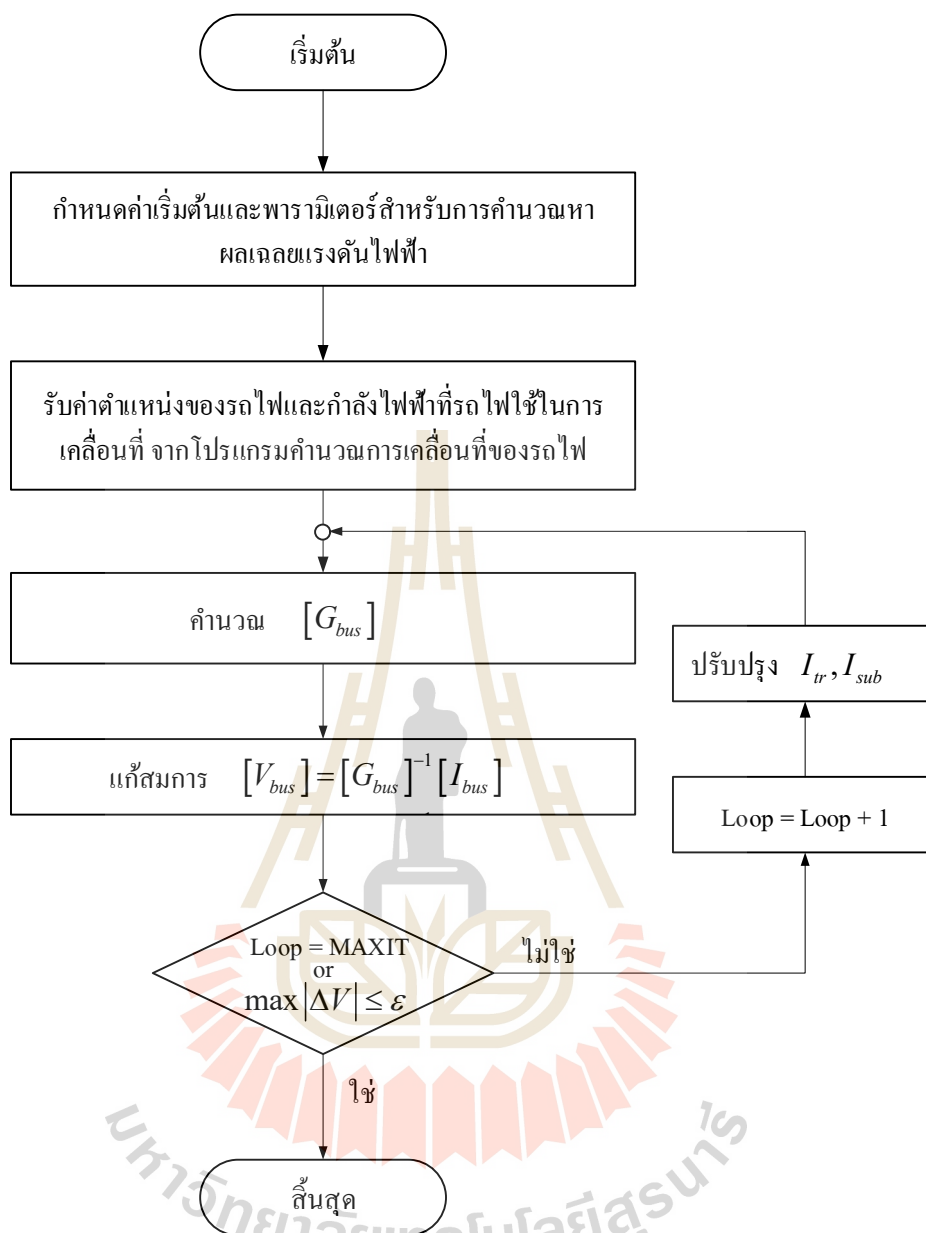
ส่วนค่า I_{tr} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.18) โดยที่ V_{tr} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขบวนรถไฟ จากรูปที่ 4.11 สามารถหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าโนดที่ 5 ลบกับแรงดันไฟฟ้าโนดที่ 6 ($V_5 - V_6$)

$$I_{tr} = \frac{P_{tr}}{V_{tr}} \quad (4.18)$$

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าจะดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ใช้ช่วงเวลาคำนวณทุก ๆ 0.1 วินาที ตำแหน่งของรถไฟฟ้าและกำลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้ารับไปจากสายจ่ายจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงานของรถไฟฟ้า เช่น โหมดเร่งความเร็ว โหมดรักษาความเร็วคงที่ โหมดแล่นด้วยความเฉื่อย หรือโหมดเบรก เป็นต้น การแก้ปัญหาต้องใช้กระบวนการแก้สมการแบบไม่เชิงเส้น เช่น วิธีคำนวณวนรอบของเกาส์ (Gauss iterative method) วิธีคำนวณวนรอบนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson iterative method) หรือวิธีการฉีดกระแส (Current injection method) (Kulworawanichpong, 2015) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการฉีดกระแสหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้ขึ้นอยู่กับสมการกระแสไฟฟ้าสมดุล (current-balance equation) ที่แต่ละบัสมากกว่าสมการกำลังไฟฟ้าสมดุล (power-balance equation) ดังสมการที่ (4.19)

$$I_{TSS,k} - \frac{P_{tr,k}}{V_k} = \sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i \quad (4.19)$$

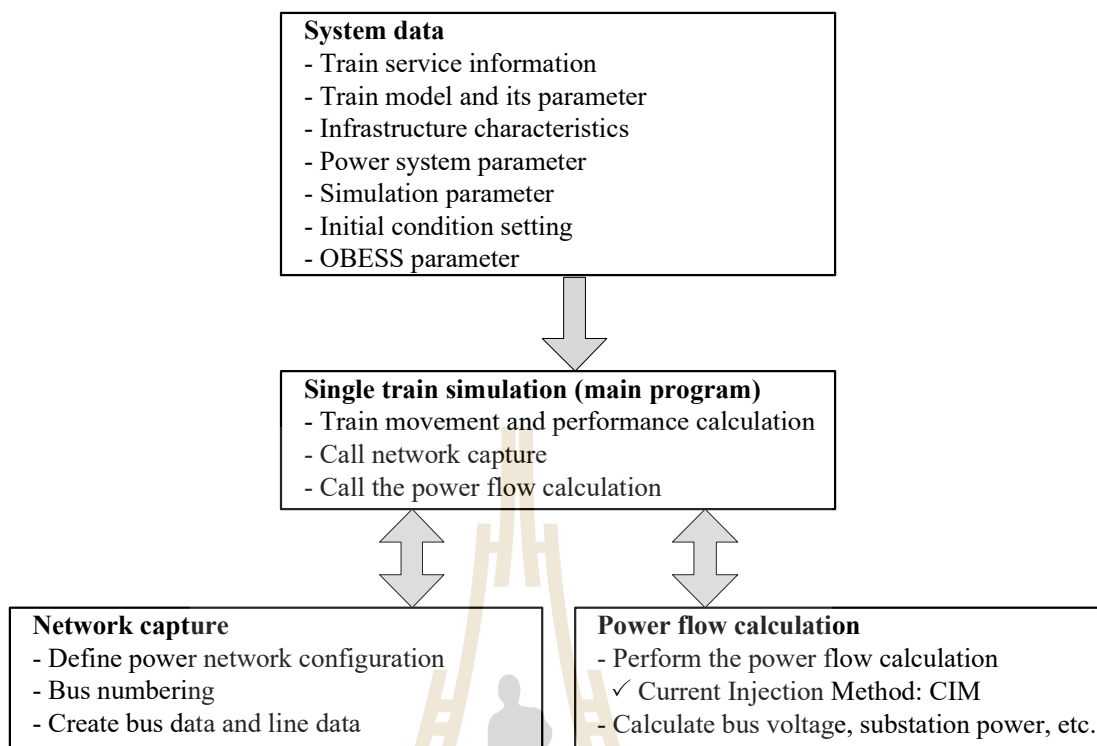
ในรูปที่ 4.10 เป็นระบบรถไฟฟ้าอย่างง่ายที่มีสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเพียง 2 สถานีเท่านั้น ในแบบจำลอง จำนวนโหนดของระบบจะเท่ากับจำนวนสถานีเรียงกระแสรวมกับจำนวนรถไฟฟ้าที่กำลังวิ่งอยู่บนราง ($N = 2N_{TSS} + 2N_{tr}$) โดยตำแหน่งรถไฟฟ้าต้องไม่ใช่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งของสถานีจ่ายไฟ สำหรับตำแหน่งของสถานีผู้โดยสาร โดยทั่วไปจะไม่พิจารณาให้เป็นโหนดของระบบเพื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้าแต่อย่างใด ถ้าจำนวนของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและจำนวนรถไฟฟ้าที่วิ่งในระบบมีมากขึ้นจะส่งผลให้จำนวนโหนดมากขึ้นด้วย ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีความเป็นพลวัต ค่าจะแปรเปลี่ยนไปตามเวลาและตำแหน่งของรถไฟฟ้าที่กำลังวิ่งอยู่บนรางตามตารางการให้บริการ ขั้นตอนการหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ขั้นตอนการหาผลเฉยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟด้วยวิธีการนิตกระแส

4.4 โปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟกระแสตรงขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน

โปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟกระแสตรงขนส่งมวลชนหนึ่งขบวนประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ การคำนวณการเคลื่อนที่และสมรรถนะของรถไฟ (train movement and performance calculation) และการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟกระแสตรง (power flow calculation) โครงสร้างของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 โครงสร้างโปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้ากระแสดตรงหนึ่งขบวน

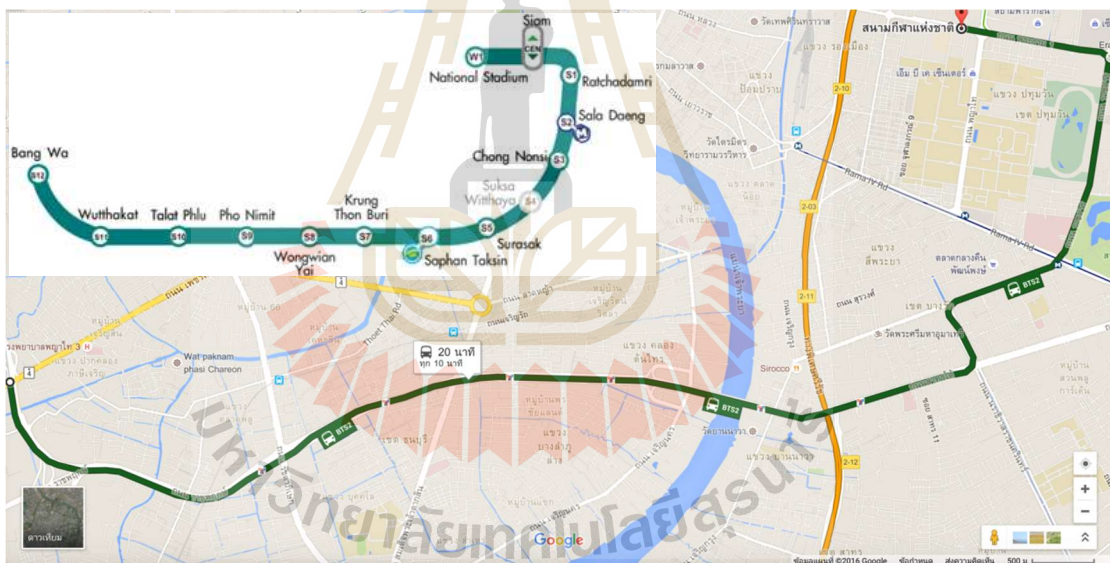
การทำงานของโปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้ากระแสดตรงหนึ่งขบวนจะเริ่มจากการรับข้อมูลของระบบรถไฟฟ้า ได้แก่ ข้อมูลการบริการของรถไฟ แบบจำลองและพารามิเตอร์ของรถไฟ คุณลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าเริ่มต้นและพารามิเตอร์สำหรับการจำลองผล รวมทั้งพารามิเตอร์ของ OBESS จากนั้นโปรแกรมจำลองผลระบบรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน ซึ่งเป็น โปรแกรมหลักจะทำการคำนวณการเคลื่อนที่และสมรรถนะของรถไฟฟ้า ต่อมาโปรแกรมหลักจะทำการเรียกโปรแกรมย่อย Network capture เพื่อสร้างข้อมูลบัสและข้อมูลระบบจ่ายไฟ แล้วจึงทำการเรียกโปรแกรมย่อยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อหาผลเฉลยแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กำลังไฟฟ้าสูญเสีย เป็นต้น โดยใช้วิธีคิดกระแสแต่ละช่วงเวลาคำนวณ ตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่จะถูกคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งของรถไฟนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังไฟฟ้าที่รถไฟถึงไปใช้ในการเคลื่อนที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับโหมดการเคลื่อนที่ของรถไฟและตำแหน่งของรถไฟ กระบวนการเหล่านี้จะดำเนินไปจนกว่าจะถึงกำหนดเวลาหยุดคำนวณหรือสถานีผู้โดยสารสุดท้าย

4.5 การทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสดตรง

การทดสอบแบบจำลองและลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสดตรงจะนำข้อมูลโครงสร้างความเร็วในการเดินทางของรถไฟฟ้า BTS สายสีลมที่ได้จากการวัด มาเปรียบเทียบกับโครงสร้างความเร็วในการเดินทางจากแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่ได้พัฒนาขึ้น และประเมินความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ รายละเอียดดังนี้

4.5.1 ระบบทดสอบ

รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ซึ่งเป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแรกที่ดำเนินการในประเทศไทย โดยสายสีลมนี้นี้ประกอบด้วยสถานีผู้โดยสาร 13 สถานี และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 7 สถานี ดังรูปที่ 4.14 รายละเอียดเส้นทางรถและพารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 (Sumpavakup and Kulworawanichpong, 2015)



รูปที่ 4.14 ระบบรถไฟฟ้า BTS SkyTrain สายสีลม

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดเส้นทางรถไฟ BTS สายสีส้ม

Station code	Station name	Position (km)	Dwell time (sec)
W1	National Stadium	0	-
CEN*	Siam	0.565	30
S1	Ratchadamri	1.777	20
S2*	Sala Daeng	3.184	30
S3	Chong Nonsi	4.204	20
S5*	Surasak	5.403	20
S6	Saphan Taksin	6.219	20
S7*	Krung Thon Buri	7.446	20
S8	Wongwian Yai	8.254	20
S9*	Pho Nimit	9.270	20
S10	Talat Phlu	10.432	20
S11*	Wulthakat	11.346	20
S12*	Bang Wa	13.009	20
STY	Stabling yard	13.649	-

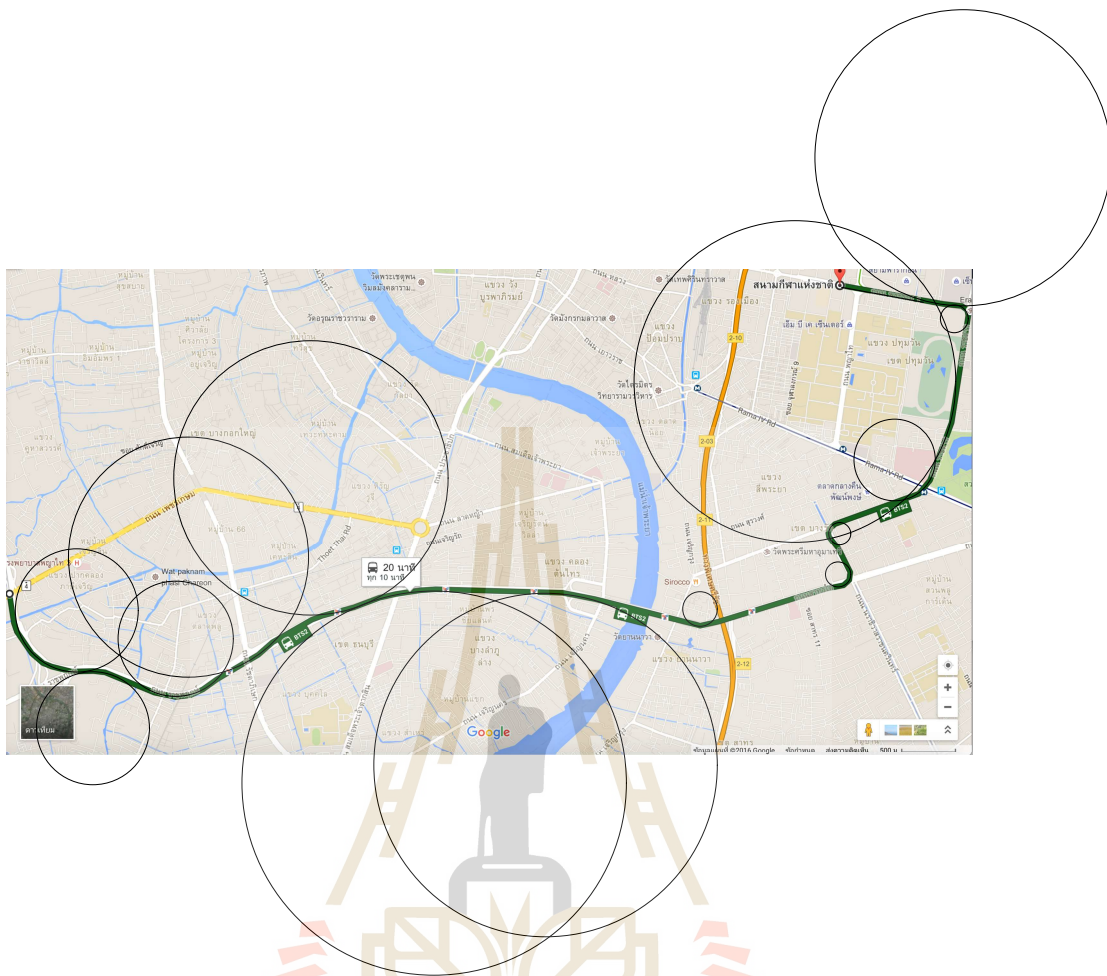
หมายเหตุ * หมายถึง สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟ BTS

Specific data	Information	
<i>Train parameters</i>		
Weight	tare weight	153 ton
	payload AW3	75 ton
Movement Feature	max. speed	80 km/h
	max. acceleration	0.87 m/s ²
	max. deceleration	1.00 m/s ²
Efficiency	gear, motor, inverter	98%, 88%, 98%
Auxiliary power	constant load	270 kW
Train resistance	A = 4025, B = 118.67, C = 0.871	
TE and BE curve	รูปที่ 4.15	

ตารางที่ 4.3 รัศมีความโค้งของรถไฟฟ้า BTS สายสีลม

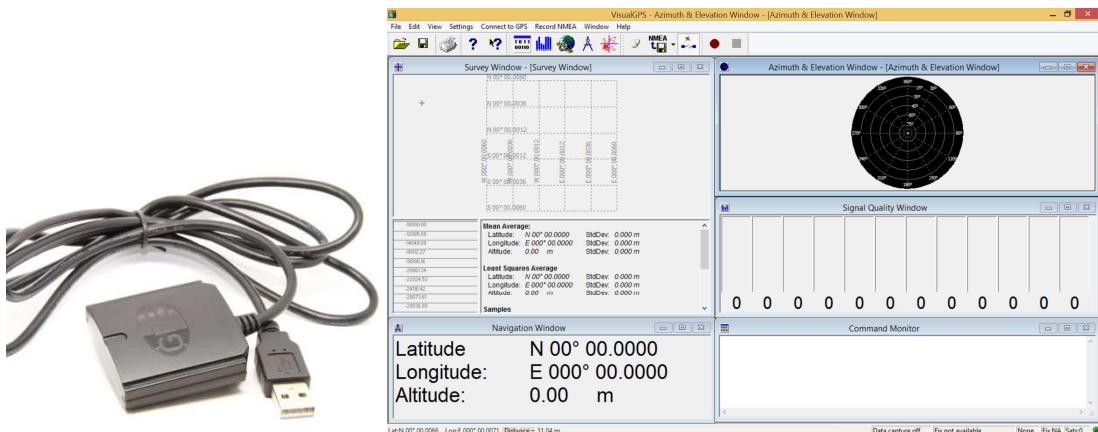
S_start (m)	S_end (m)	r (m)
0	850.6	0
850.61	1110.61	2611.32
1110.62	1340.62	250.02
1340.63	2040.63	0
2040.64	2540.64	1416.78
2540.65	2770.65	0
2770.66	3170.66	361.14
3170.67	3820.67	0
3820.68	4120.68	97.23
4120.69	4370.69	0
4370.7	4670.7	111.12
4670.71	5970.71	0
5970.72	6170.72	152.79
6170.73	6970.73	0
6970.74	7670.74	1527
7670.75	8420.75	0
8420.76	9020.76	1722.36
9020.77	9620.77	1222.32
9620.78	10120.78	0
10120.79	10620.79	1055.64
10620.8	10830.8	0
10830.81	11380.81	500.04
11380.82	11660.82	0
11660.83	11960.83	500.04
11960.84	12807.84	541.71
12807.85	13649	0



รูปที่ 4.17 การหารัศมีความโค้งของทางวิ่งด้วยวิธีอย่างง่าย

4.5.2 ข้อมูลที่ได้จากการวัด

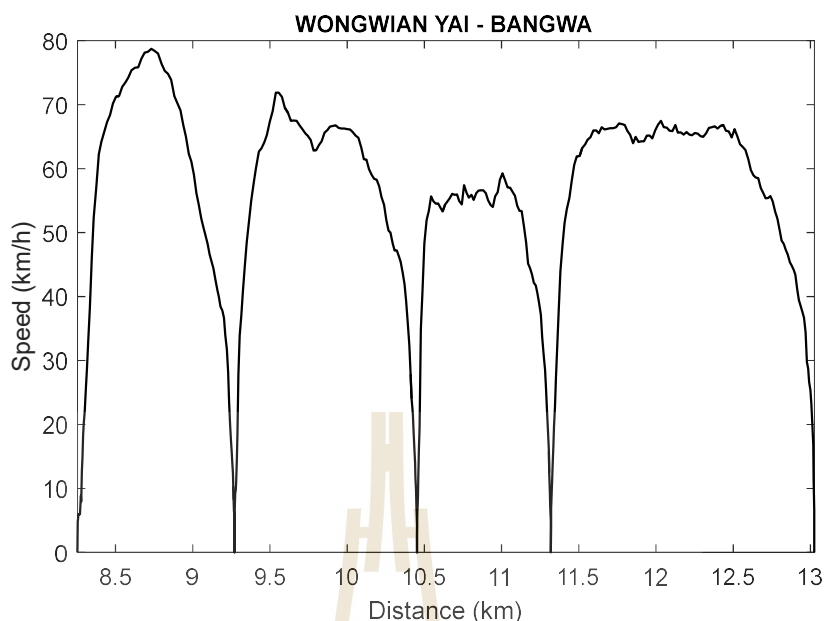
ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะเป็นข้อมูลโครงสร้างความเร็วเทียบกับระยะทางของรถไฟฟ้า BTS สายสีลม จากสถานีวงเวียนใหญ่ (S6) ไปยังสถานีบางหว้า (S12) รวมทั้งสิ้น 5 สถานี ระยะทาง 4.454 km ซึ่งทำการวัดโดยใช้อุปกรณ์ SKYLAB GPS module รุ่น SKM55 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะแสดงดังตารางที่ 4.4 และโปรแกรม VisualGPS ดังรูปที่ 4.18 เพื่อเก็บข้อมูลดังกล่าว โครงสร้างความเร็วที่ได้จากการวัดแสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 อุปกรณ์ GPS module ที่ใช้วัดค่าโครงสร้างความเร็วและหน้าต่างโปรแกรม VisualGPS

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลจำเพาะของ SKYLAB GPS module รุ่น SKM55

Parameter	Specification	
GPS receiver		
Receiver Type	L1 frequency band, C/A code, 22 Tracking / 66 Acquisition-Channel	
Sensitivity	Tracking	-165 dBm
	Acquisition	-148 dBm
Accuracy	Position	3.0 m CEP50 without SA (Typical Open Sky)
	Velocity	0.1 m/s without SA
Acquisition Time	Cold Start	32 s
	Warm Start	23 s
	Hot Start	1 s
	Re-Acquisition	<1 s
Power Consumption	Tracking	30mA @3.3V Typical
	Acquisition	35mA @3.3V
Navigation Data Update Rate	1 Hz	
Operational Limits	Altitude	Max 18,000 m
	Velocity	Max 515 m/s
	Acceleration	Less than 4 g

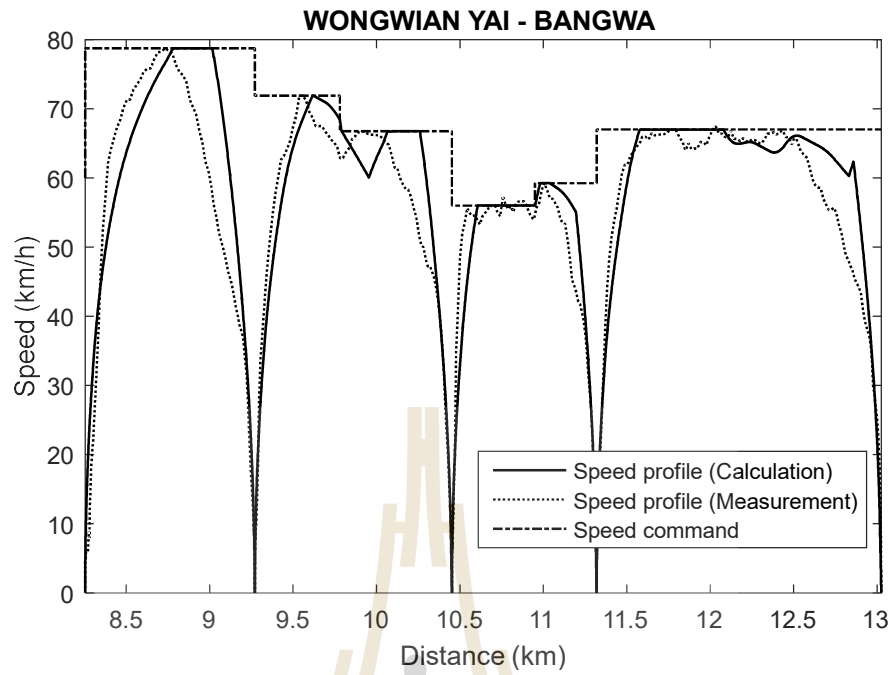


รูปที่ 4.19 ข้อมูลโครงร่างความเร็วที่ได้จากการวัด

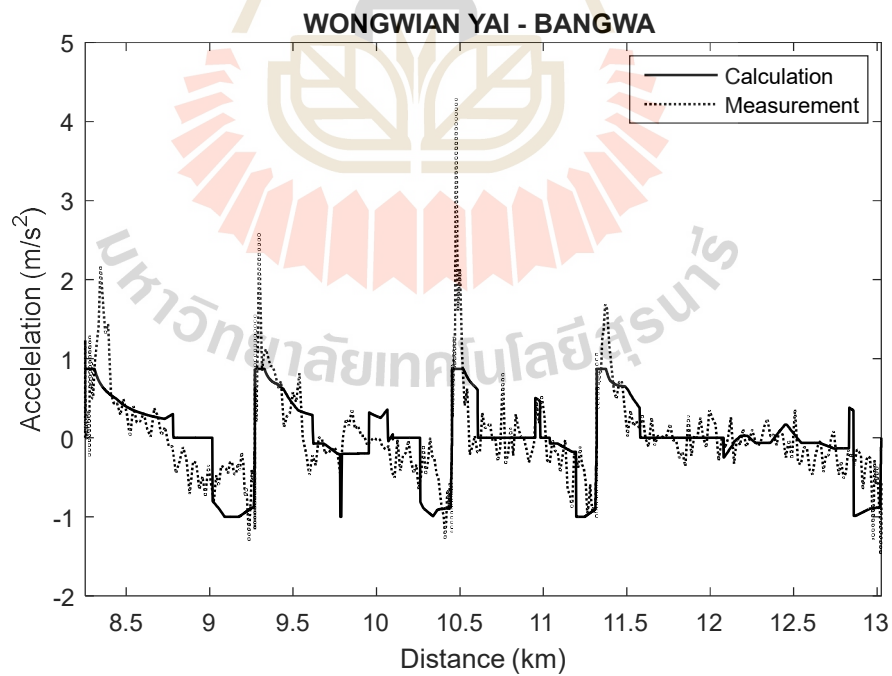
4.5.3 การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบและประเมินผลจะทำการกำหนดโครงร่างความเร็วที่ได้ออกแบบขึ้นให้สอดคล้องกับโครงร่างความเร็วที่ได้จากการวัด และทำการรันโปรแกรมแบบจำลองการเคลื่อนที่ได้พัฒนาขึ้น และเปรียบเทียบโครงร่างความเร็ว ความเร่ง กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าสะสมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ โดยการคำนวณค่าความเร่ง กำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าสะสมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ที่ได้จากการวัดนั้นคำนวณจากข้อมูลโครงร่างความเร็วที่ได้จากการวัด ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.20 – 4.23

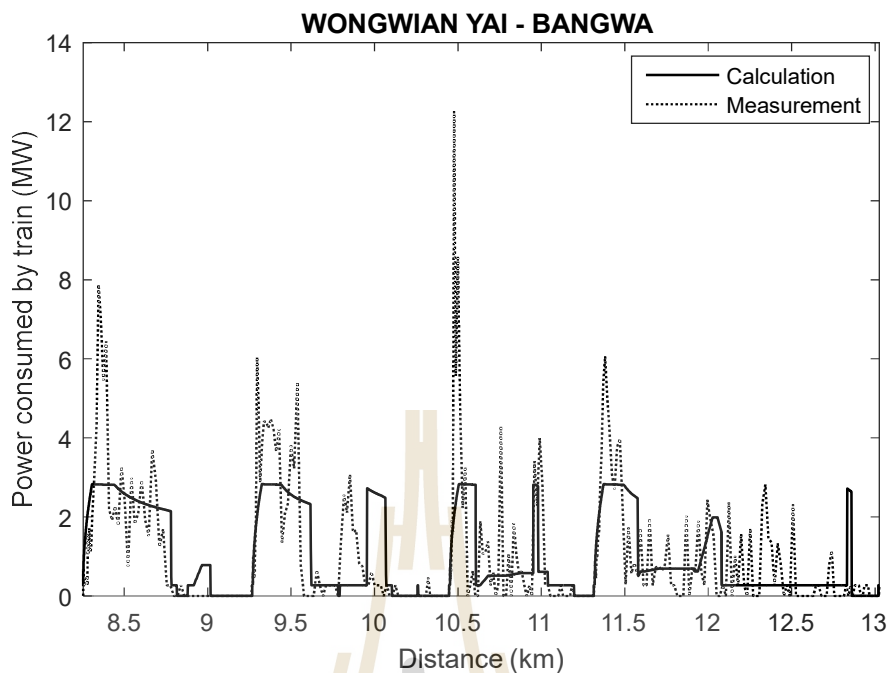
ข้อมูลโครงร่างความเร็วที่ได้จากการวัดเทียบกับโครงร่างความเร็วที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าโครงร่างความเร็วที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะโครงร่างที่สอดคล้องกับโครงร่างที่ได้จากการวัด แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดอาจมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งอาจจะเกิดจากสัญญาณ GPS ที่ไม่เสถียร อีกทั้งข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองอาจจะไม่ใช่ข้อมูลในสภาพความเป็นจริง เช่น ระดับเกรดเดียนต์ รัศมีความโค้งของทางวิ่ง แรงต้านทานทางวิ่ง คุณสมบัติแรงฉุดลากและแรงเบรกของหัวรถจักรไฟฟ้า BTS หรือแม้กระทั่งน้ำหนักประสิทธิผล ซึ่งค่าต่าง ๆ เหล่านี้มีผลต่อการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าทั้งสิ้น



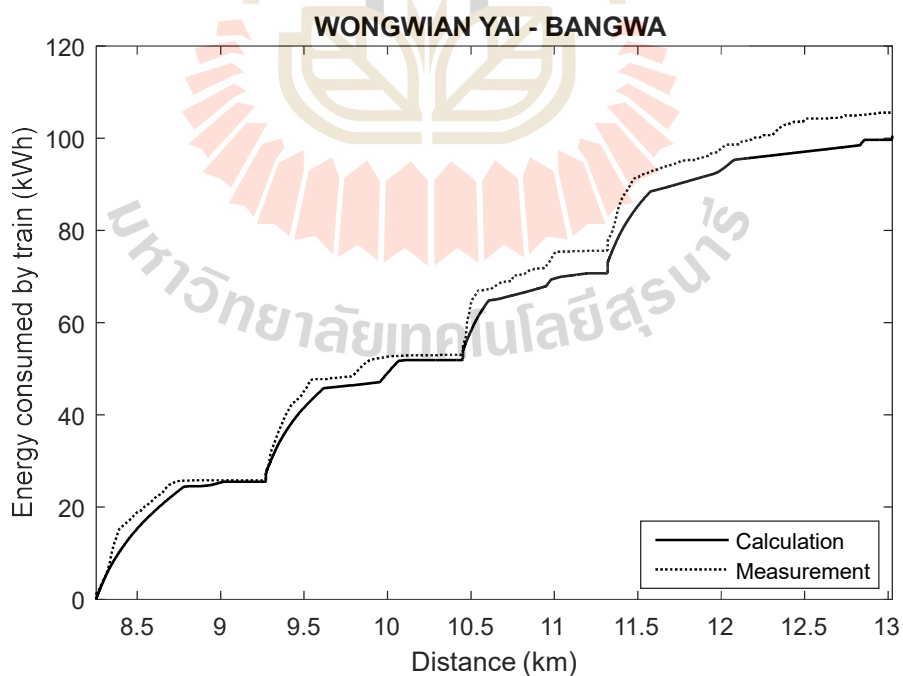
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบโครงร่างความเร็วที่ได้จากการวัดกับแบบจำลองที่พัฒนา



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าความเร่งที่คำนวณได้จากค่าวัดกับแบบจำลองที่พัฒนา



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จากค่าวัดกับแบบจำลองที่พัฒนา



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสะสมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จากค่าวัดกับแบบจำลองที่พัฒนา

ตารางที่ 4.5 ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

พารามิเตอร์	คำนวณจากค่าวัด	แบบจำลองที่พัฒนา	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
พลังงานไฟฟ้าที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ (kWh)	105.6943	100.5550	5.1109

รูปที่ 4.21 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเร่งที่คำนวณได้จากค่าวัดกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าความเร่งที่คำนวณได้จากค่าวัดนั้นมีค่าแกว่งค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร่งที่ได้จากแบบจำลอง บางช่วงเวลามีค่าสูงมากถึง 4 m/s^2 ซึ่งเป็นผลมาจากการคำนวณค่าความเร่งจากค่าความเร็วที่วัดได้ ส่วนการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ที่ได้จากค่าวัดมีค่ามากที่สุดถึง 12 MW ซึ่งแตกต่างจากค่าที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนามาก แต่เมื่อคำนวณเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสะสมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าค่าพลังงานไฟฟ้าสะสมที่ได้จากค่าวัดมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าพลังงานไฟฟ้าสะสมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองดังตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง และสามารถนำมาใช้จำลองผลระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 5.11% เมื่อเทียบค่าวัด

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนหนึ่งขบวน ประกอบไปด้วยแบบจำลองและลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า แบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากระแสตรง โดยแบบจำลองที่พัฒนามีความละเอียดมากกว่าทั่วไปที่นำความต้านทานของรางวิ่งไปรวมกับความต้านทานของรางตัวนำ ซึ่งทำให้ไม่สามารถคำนวณแรงดันรางและกระแสรั่วไหลได้แต่แบบจำลองที่พัฒนาสามารถคำนวณได้ รวมทั้งการทดสอบและประเมินความถูกต้องของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากับระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลม อีกด้วย

บทที่ 5

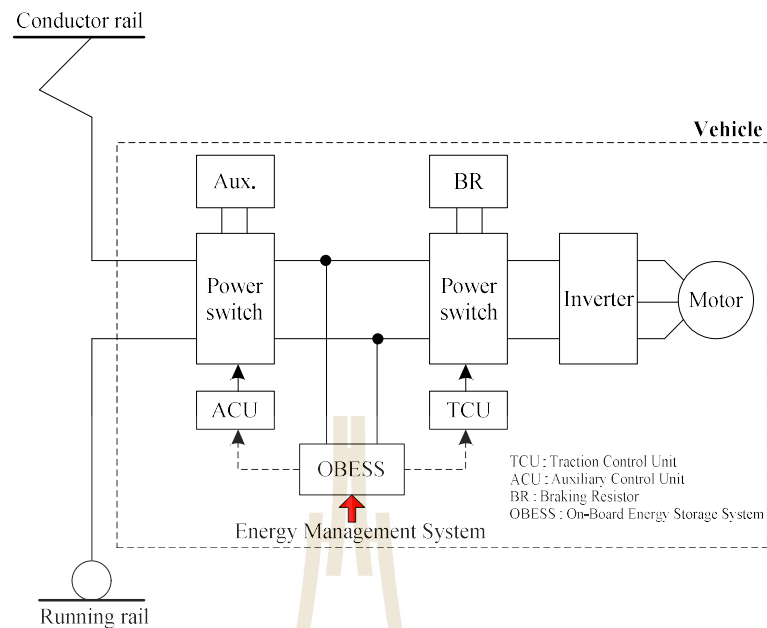
การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ

5.1 บทนำ

ระบบเก็บสะสมพลังงานถูกนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ซึ่งการประยุกต์ใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบรถไฟฟ้าให้สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์การใช้งานได้นั้น ย่อมต้องอาศัยกลยุทธ์ในการควบคุมระบบเก็บสะสมพลังงานที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ บทนี้นำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถ หรือ OBESS ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.2 กลยุทธ์การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS

การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS จะขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างแผนภาพการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS ระบบการจัดการพลังงาน (energy management system) จะเป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของ OBESS ซึ่งจะไปควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนระบบลากจูงและส่วนระบบไฟฟ้าเสริมผ่านหน่วยควบคุมระบบลากจูง (Traction Control Unit: TCU) และหน่วยควบคุมระบบไฟฟ้าเสริม (Auxiliary Control Unit: ACU) ตามลำดับ TCU จะไปควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบลากจูง เช่น จัดการพลังงานที่ได้จากการเบรกไปเก็บไว้ที่ OBESS หรือถ้า OBESS ไม่สามารถเก็บพลังงานดังกล่าวได้ก็ให้กำลังไฟฟ้าไหลไปที่ตัวต้านทานการเบรกเพื่อทิ้งพลังงานไปในรูปของความร้อน เป็นต้น ACU จะไปควบคุมการจ่ายไฟให้กับระบบไฟฟ้าเสริมในรถไฟฟ้า เช่น ให้ระบบไฟฟ้าเสริมรับไฟจากรางตัวนำ (conductor rail) หรือรับไฟจาก OBESS เป็นต้น



รูปที่ 5.1 แผนภาพระบบจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS

กลยุทธ์การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ OBESS มีหลายกลยุทธ์ที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมา แต่ละกลยุทธ์มีความยากง่ายแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น กลยุทธ์การเขียนกฎ (rule based strategy) จะเป็นกลยุทธ์ที่ง่ายที่สุดและการกำหนดกฎมักจะขึ้นอยู่กับโหมดการเร่ง โหมดเบรกคืนพลังงานกลับ (regenerative braking) (Battistelli et al., 2009; Takagi, and Amano, 2014) โครงร่างความเร็วหรือกำลังไฟฟ้าของรถไฟที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Grigans, and Latkovskis, 2010) กลยุทธ์ที่อยู่บนพื้นฐานการควบคุมแบบสัดส่วนโดยใช้สถานะการประจุ ป้อนกลับ (State of Charge: SOC) (Zhao et al., 2010) กลยุทธ์ควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic) (Talla et al., 2015) หรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) (Moreno, Ortuzar, and Dixon, 2006) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอในรูปแบบการควบคุมการอัดประจุและคายประจุของ OBESS เพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของการลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟในช่วงเร่ง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอกลยุทธ์การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอด (peak power reducing strategy) ของรถไฟพร้อมกับ OBESS เป็นหลักจากงานวิจัยที่ผ่านมา 3 วิธี ได้แก่ กลยุทธ์ควบคุมการตัดค่ายอดของกำลังไฟฟ้า (peak shaving control strategy) (Grigans, and Latkovskis, 2010) กลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control strategy) (Grigans, and Latkovskis, 2010) และกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ (SOC control strategy) (Barrero, Mierlo, and Tackoen, 2008) ซึ่งจะเป็นการพิจารณาเฉพาะการไหลของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น ไม่

คำนึงถึงวงจรหรือการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมทั้งนำเสนอกลยุทธ์ของผู้วิจัยที่พัฒนาขึ้นมา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.2.1 กลยุทธ์ควบคุมการตัดคายของกำลังไฟฟ้า

แนวคิดหลักของกลยุทธ์ควบคุมการตัดคายของกำลังไฟฟ้า คือ เพื่อเก็บพลังงานจากการเบรกและคายประจุจากอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานเมื่อกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสูงกว่าระดับกำลังไฟฟ้า P_l ซึ่งมีค่าเท่ากับ IP_{peak} โดยที่ I คือ สัมประสิทธิ์ปรับคูณ P_l (มีค่าไม่เกิน 1) P_{peak} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้า ดังนั้นกำลังไฟฟ้าคายประจุของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน (P_{dis}) จะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (P_{tr}) กับ P_l ดังสมการที่ (5.1)

$$P_{dis} = P_{tr} - P_l \quad (5.1)$$

5.2.2 กลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน

แนวคิดหลักของกลยุทธ์การควบคุมแบบสัดส่วน คือ เพื่อเก็บพลังงานจากการเบรกและคายประจุจากอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานด้วยสัดส่วนสัมประสิทธิ์ k (มีค่าไม่เกิน 1) ของกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า P_{trac} (traction power) ดังสมการที่ (5.2)

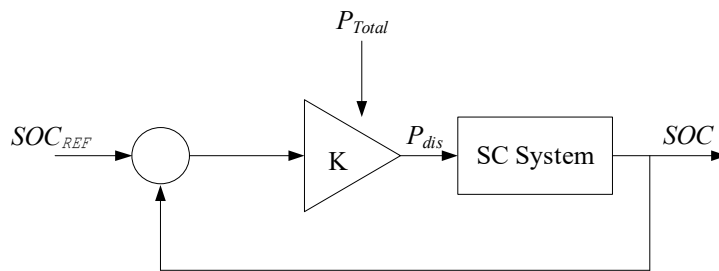
$$P_{dis} = k \times P_{trac} \quad (5.2)$$

5.2.3 กลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ

แนวคิดหลักของกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ คือ พร้อมที่จะเก็บพลังงานจำนวนมากจากการเบรกเมื่อจำเป็น และใช้พลังงานที่เก็บได้เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากระบบ ใช้การควบคุมแบบสัดส่วนผ่านสัมประสิทธิ์ K เพื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายโดย EDLC ดังสมการที่ (5.3) ซึ่งคำนึงถึง 3 อินพุต คือ ค่าจริงสถานะประจุของ EDLC ความเร็วของรถไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่จำเป็นต้องใช้ในการเคลื่อนที่

$$P_{dis} = K \times (SOC_{REF} - SOC) \quad (5.3)$$

$$\text{โดยที่ } SOC_{REF} = \frac{K_1 \times E_{Kinetic}}{E_{SCmax}} \text{ และ } E_{Kinetic} = \frac{1}{2} \times M \times v^2$$



รูปที่ 5.2 แผนภาพกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ

EDLC เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่มีข้อดีและความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนมากกว่าอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานอื่นดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ความแตกต่างทางคุณสมบัติและผลิตภัณฑ์ของ EDLC โมดูลที่ใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบรถไฟฟ้าถูกนำเสนอโดยหลายบริษัทผู้ผลิตต่างประเทศ ตัวอย่างของ EDLC โมดูลที่มีอยู่ในท้องตลาด ได้แก่ MITRAC Energy Saver ของบริษัท Bombardier Transportation, SITRAS SES ของบริษัท Siemens, STEEM ของบริษัท Alstom Transport เป็นต้น ในงานวิจัยเลือก MITRAC Energy Saver ของบริษัท Bombardier Transportation เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่จะนำมาติดตั้งบนขบวนรถเนื่องจากมีความหนาแน่นทางพลังงาน (Wh/kg) ต่อโมดูลมากที่สุดเมื่อเทียบกับของบริษัทอื่น (Ratniyomchai, Hillmansen, and Tricoli, 2014) โดยมีข้อมูลทางเทคนิคดังรูปที่ 5.3 ซึ่งข้อมูลในเส้นประเป็นข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

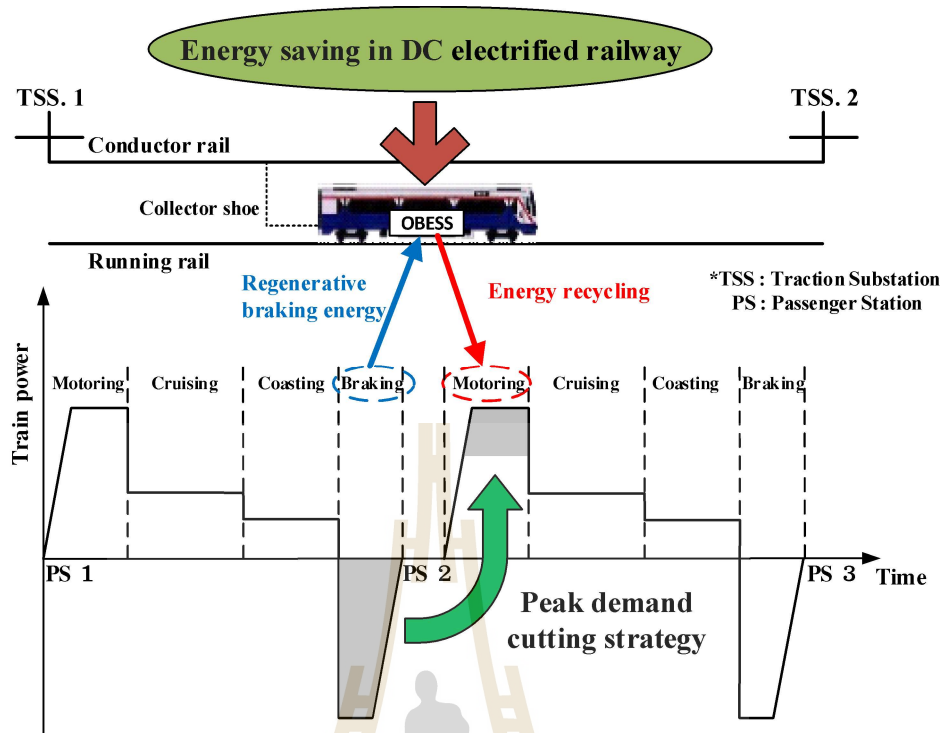


	MITRAC Energy Saver Unit		
Installed energy (kWh)	1	1	1,17
Max output power (kW)	300	300	100
Cooling	forced air cooling	forced air cooling	natural convection cooling
Weight (kg)	477	428	466
Dimensions (mm)	1900x950x455	1700x680x450 (partly 550)	1800x1500x250

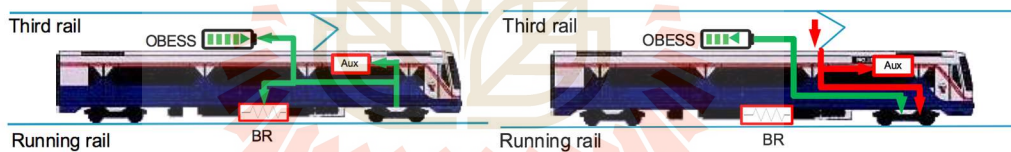
รูปที่ 5.3 MITRAC Energy Saver ของบริษัท Bombardier Transportation (Bombardier, 2009)

5.3 กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด (peak demand cutting strategy)

กลยุทธ์ที่ผู้วิจัยนำเสนอจะเป็นกลยุทธ์ที่พัฒนาเพื่อใช้ควบคุมการอัดประจุและคายประจุของ OBESS เพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของการลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟในช่วงเร่ง (Sumpavakup, Ratniyomchai and Kulworawanichpong, 2017) อธิบายได้ดังรูปที่ 5.4 โดยพิจารณาเฉพาะการไหลของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น ไม่คำนึงถึงวงจรหรือการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การไหลของกำลังไฟฟ้าภายในระบบรถไฟฟ้าขณะรถไฟฟ้าอยู่ในสถานะการอัดประจุและคายประจุแสดงดังรูปที่ 5.5 ขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเท่านั้น ดังนั้นขณะที่รถไฟฟ้าเบรกพลังงานคืนกลับที่ได้จากการเบรกจะถูกจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าเสริมก่อนจะถูกอัดประจุเก็บสะสมไว้ที่ OBESS ถ้าค่าความจุพลังงานไฟฟ้าของ OBESS เต็ม พลังงานที่เหลือจะถูกกำจัดทิ้งไปในรูปของความร้อนโดยตัวต้านทานการเบรกไฟฟ้า เมื่อรถไฟฟ้าเร่ง ระบบไฟฟ้าเสริมจะดึงพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านทางรางตัวนำ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนจะถูกจ่ายมาจาก OBESS เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดย OBESS ไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้รถไฟฟ้าสำหรับการเร่ง พลังงานไฟฟ้าที่ต้องการนั้นจะถูกจ่ายโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านรางตัวนำ ซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้าค่ายอดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะถูกชดเชยด้วยพลังงานไฟฟ้าที่เก็บได้จากการเบรกของ OBESS แผนภาพการจัดการพลังงานของระบบรถไฟฟ้าที่นำเสนอโดยเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้ง OBESS แสดงดังรูปที่ 5.6 ซึ่งปกติขณะรถไฟฟ้าเร่งจะดึงไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านรางตัวนำและขณะรถไฟฟ้าเบรกจะกำหนดให้พลังงานคืนกลับที่ได้จากเบรกจะถูกจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าเสริมก่อนส่วนพลังงานไฟฟ้าที่เหลือจะถูกกำจัดทิ้งไปในรูปของความร้อนโดยตัวต้านทานการเบรกไฟฟ้า



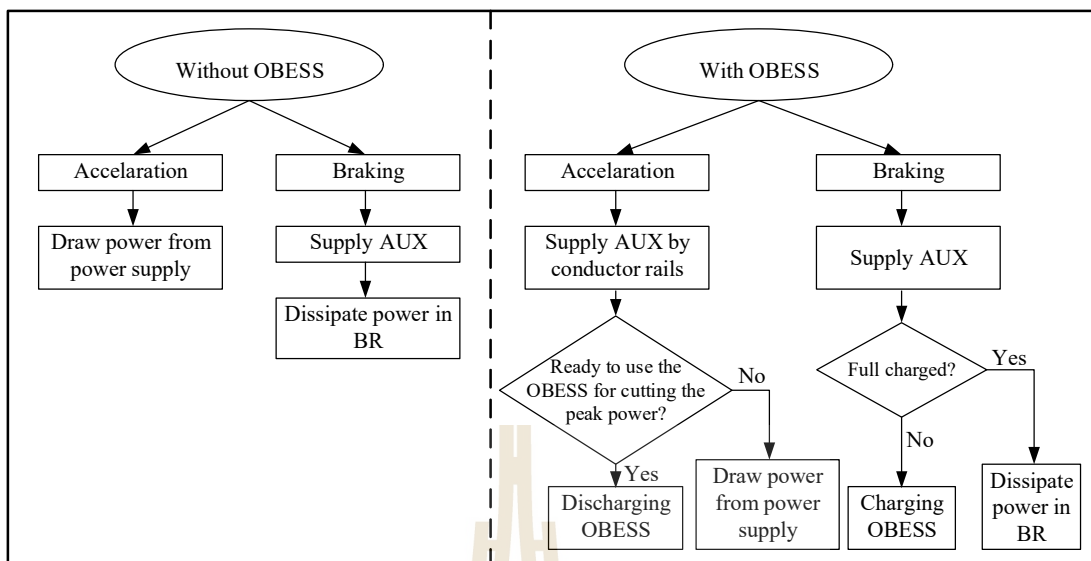
รูปที่ 5.4 แผนภาพการจัดการพลังงานคืนกลับด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด



ก) ขณะเบรก

ข) ขณะเร่งความเร็ว

รูปที่ 5.5 การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อจัดการพลังงานคืนกลับด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด



รูปที่ 5.6 แผนภาพเปรียบเทียบการจัดการพลังงานกรณีไม่ได้ติดตั้งและติดตั้ง OBESS

5.3.1 แบบจำลองการควบคุมการอัดประจุ

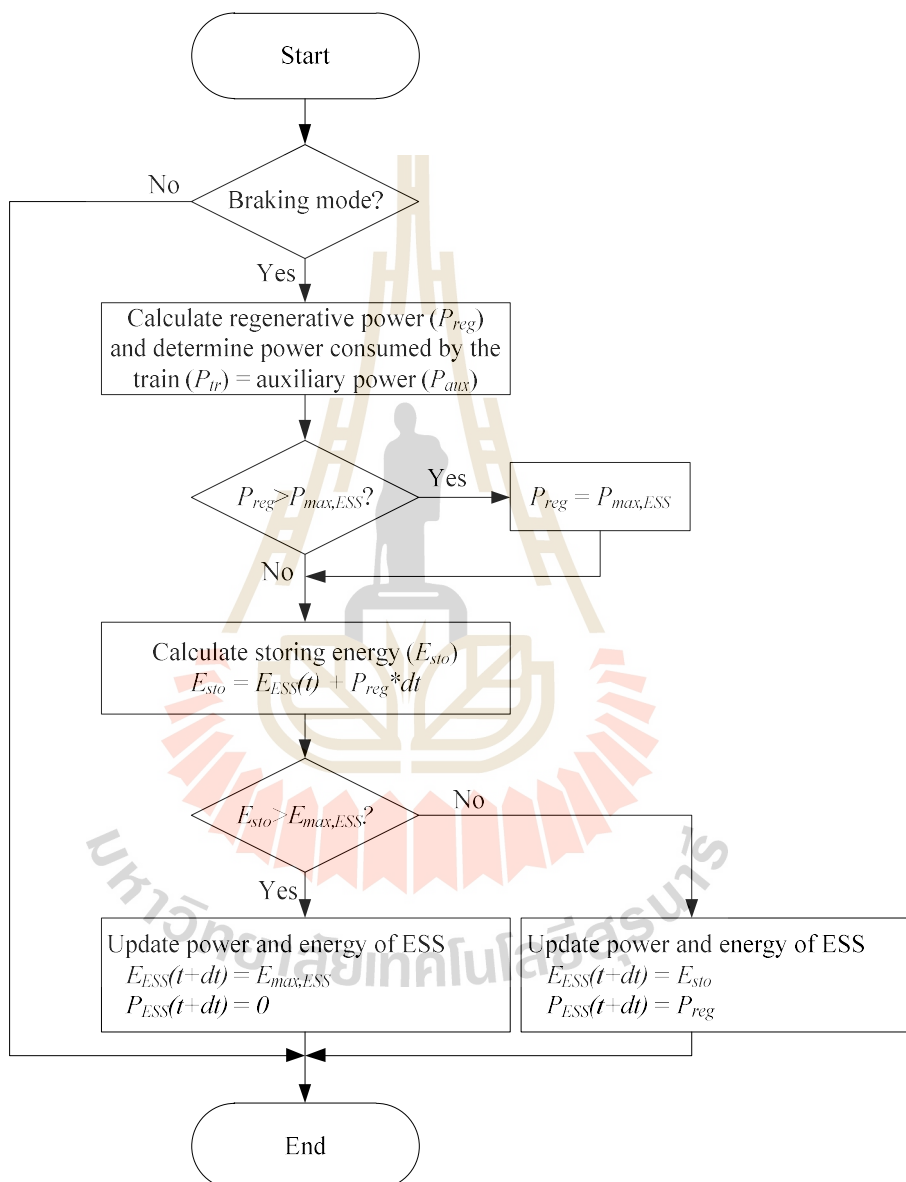
โหมดการทำงานของรถไฟไฟฟ้าจะต้องถูกตรวจสอบก่อน โดยจะเข้าสู่แบบจำลองการควบคุมการอัดประจุก็ต่อเมื่อการทำงานของรถไฟอยู่ในโหมดเบรก หลังจากนั้นจะทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าคืนกลับจากการเบรก (regenerative braking power) จากสมการที่ (5.4) โดยที่ η_{charge} คือ ประสิทธิภาพของการอัดประจุ ซึ่งจะขึ้นกับประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_{motor}) ประสิทธิภาพของเกียร์ (η_{gear}) ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ (η_{inv}) และประสิทธิภาพของ OBESS (η_{ESS}) ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของ chopper (η_{chopper}) และประสิทธิภาพของ EDLC (η_{EDLC}) จำนวนได้ดังสมการที่ (5.5) และ (5.6) พลังงานจากการเบรคนั้นจะถูกเก็บสะสมใน OBESS สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.7) เนื่องจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของระบบรถไฟที่พิจารณาเป็นสถานีไฟฟ้าชนิดเรียงกระแส (rectifier substation) ทำให้พลังงานคืนกลับจากการเบรกไม่สามารถไหลย้อนกลับไปในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้นเมื่อความจุพลังงานไฟฟ้าใน OBESS เต็ม พลังงานคืนกลับจากการเบรคนี้อาจจะไหลไปที่ตัวต้านทานการเบรกไฟฟ้าเพื่อกำจัดทิ้งในรูปของความร้อน แผนภาพกระบวนการทำงานของแบบจำลองการอัดประจุแสดงดังรูปที่ 5.7

$$P_{\text{reg}} = P_{\text{charge}} = F_T \times v \times \eta_{\text{charge}} \quad (5.4)$$

$$\eta_{\text{charge}} = \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{gear}} \times \eta_{\text{inv}} \times \eta_{\text{ESS}} \quad (5.5)$$

$$\eta_{ESS} = \eta_{chopper} \times \eta_{EDLC} \quad (5.6)$$

$$E_{ESS}(t + \Delta t) = E_{ESS}(t) + P_{reg} \Delta t \quad (5.7)$$



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการควบคุมการอัดประจุของ OBESS

5.3.2 แบบจำลองการควบคุมการคายประจุ

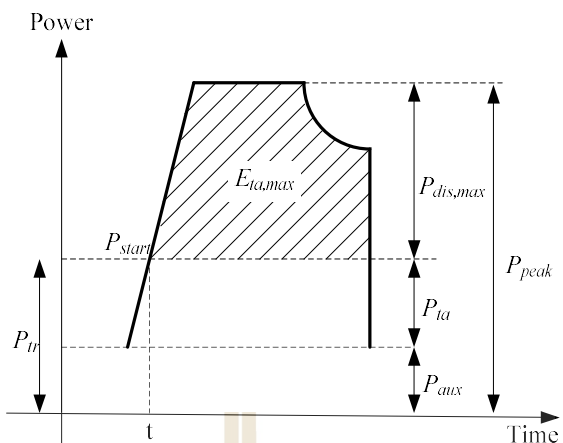
โหมดการทำงานของรถไฟฟ้าจะต้องถูกตรวจสอบก่อนเช่นกัน โดยจะเข้าสู่แบบจำลองการควบคุมการคายประจุก็ต่อเมื่อการทำงานของรถไฟฟ้าอยู่ในโหมดเร่งความเร็ว กำลังไฟฟ้าลากจูงสำหรับการเร่งความเร็วของรถไฟฟ้าจะถูกจ่ายจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านรางตัวนำจนกระทั่งถึงเงื่อนไขเริ่มต้นการคายประจุของ OBESS แสดงดังรูปที่ 5.8 จากนั้นกำลังไฟฟ้าลากจูงจะถูกจ่ายจากพลังงานไฟฟ้าที่เก็บไว้จาก OBESS สำหรับการตัดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของแหล่งจ่ายไฟฟ้เื่อนไขเริ่มต้นการคายประจุของ OBESS คือ เมื่อกำลังไฟฟ้าลากจูงที่ต้องการซึ่งจะได้จากการคำนวณล่วงหน้ามีค่ามากกว่าความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าค่ายอดและค่ากำลังไฟฟ้าคายประจุสูงสุดที่จ่ายได้จาก OBESS ดังสมการที่ (5.8) หลังจากนั้น OBESS จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าต่อเนื่องจนกระทั่งถึงขีดจำกัดต่ำสุดของ SOC โดยกำหนดช่วงการอัดประจุและคายประจุของ OBESS เท่ากับ $20 < \%SOC < 95$ กำลังไฟฟ้าคายประจุและพลังงานไฟฟ้าสะสมของ OBESS สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.9) และ (5.10) ตามลำดับ โดยที่ $\eta_{\text{discharge}}$ คือ ประสิทธิภาพของการคายประจุ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.11) อย่างไรก็ตามถ้า OBESS ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับการทำงานของรถไฟฟ้าได้ รถไฟฟ้าจะรับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านรางตัวนำเพื่อสนับสนุนการทำงานของรถไฟฟ้า กระบวนการทำงานของแบบจำลองการควบคุมการคายประจุแสดงดังรูปที่ 5.9

$$P_{tr} \geq P_{peak} - P_{dis,max} \quad (5.8)$$

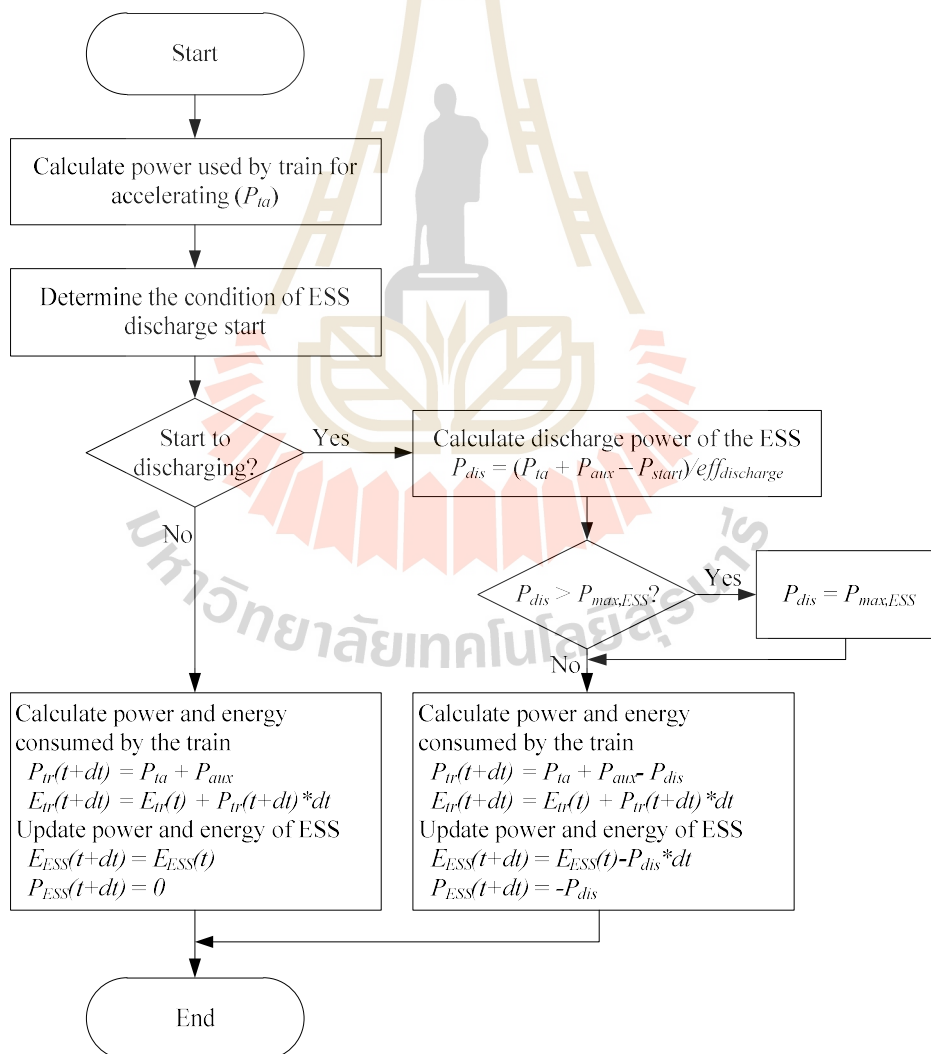
$$P_{dis}(t + \Delta t) = (P_{ta}(t + \Delta t) + P_{aux} - P_{start}) / \eta_{\text{discharge}} \quad (5.9)$$

$$E_{ESS}(t + \Delta t) = E_{ESS}(t) - (P_{dis}(t + \Delta t) \times \Delta t) \quad (5.10)$$

$$\eta_{\text{discharge}} = \eta_{\text{motor}} \times \eta_{\text{gear}} \times \eta_{\text{inv}} \times \eta_{\text{ESS}} \quad (5.11)$$



รูปที่ 5.8 เส้นไขการหาจุดเริ่มต้น P_{start} ของแบบจำลองการควบคุมการคายประจุของ OBESS



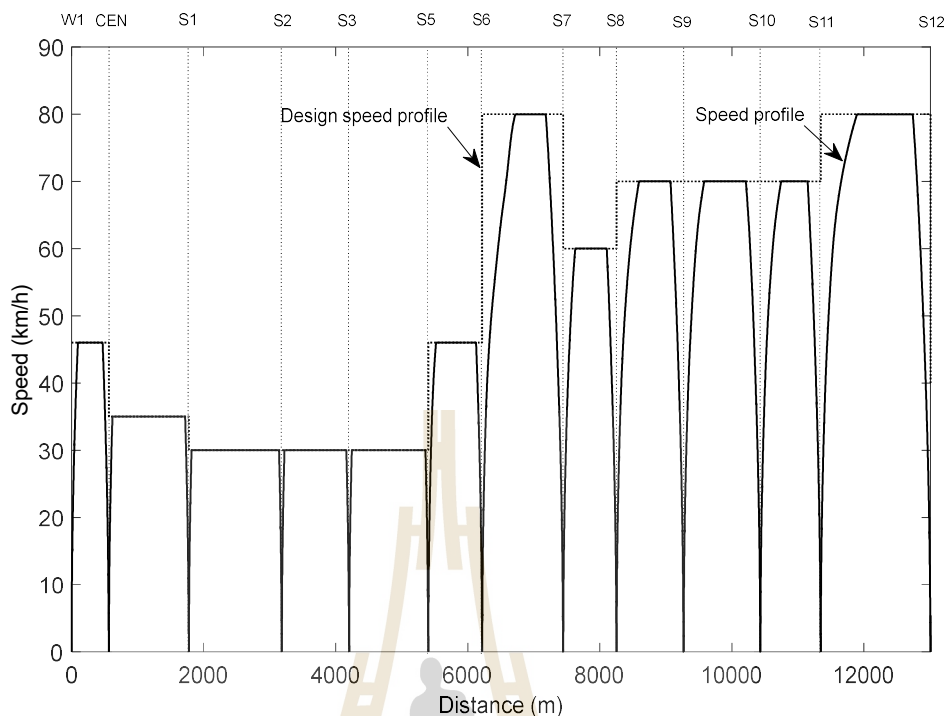
รูปที่ 5.9 ขั้นตอนการควบคุมการคายประจุของ OBESS

5.4 การทดสอบและผลการทดสอบกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด

การทดสอบจะนำมาทดสอบกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนของประเทศไทย ได้แก่ รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ประกอบด้วยสถานีผู้โดยสาร 13 สถานี และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 7 สถานี ซึ่งรายละเอียดของระบบดังกล่าวได้แสดงไว้ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.5.1 เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผลแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผล

Specific data	Information	
<i>Train parameters</i>		
Voltage	nominal voltage	750 V
Weight	tare weight	153 ton
	payload AW3	75 ton
Movement Feature	max. speed	80 km/h
	max. acceleration	0.87 m/s ²
	max. deceleration	1.00 m/s ²
Efficiency	gear, motor, inverter	98%, 88%, 98%
	EDLC, chopper	86%, 95%
Auxiliary power	constant load	270 kW
Train resistance	A = 4025, B = 118.67, C = 0.871	
TE and BE curve	รูปที่ 4.15	
<i>Power system parameters</i>		
Traction substation	no-load voltage	790 V
	rated power	2550 kVA (CEN, S02, S05, S07) 3300 kVA (S09, S11, S12)
Third rail and Running rail	third rail resistance	8.23 m \square /km
	running rail resistance	40.46 m \square /km
	conductivity to earth	0.1 S/km
<i>OBESS parameter</i>		
MITRAC Energy Saver	10 modules	



รูปที่ 5.10 การควบคุมความเร็วตามโครงร่างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้

ในการจำลองผลกำหนดให้มีขบวนรถไฟให้บริการ 1 ขบวน วิ่งจากสถานี W1 ไป S12 รวมระยะทางทั้งสิ้น 13.009 กิโลเมตร กำหนดเส้นโค้งความเร็วในการวิ่งของรถไฟดังรูปที่ 5.10 ซึ่งความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 80 km/h และทำการติดตั้ง ESS บนขบวนรถไฟจำนวน 10 โมดูล และเปรียบเทียบผลการจำลองกรณีใช้กลยุทธ์การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอด 3 วิธีดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นกับกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอดที่พัฒนา ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟ (E_{tr}) และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (E_{sub}) กำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟ ($P_{tr,max}$) และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ($P_{sub,max}$) แรงดันไฟฟ้าที่รถไฟ (V_{tr}) และสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (V_{sub}) แรงดันราง (V_{rail}) กระแสรั่วไหล (I_{stray}) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวม (E_{loss}) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก (E_{waste}) เทียบกับค่า SOC เริ่มต้น (initial SOC) ตั้งแต่ 20-95% ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแต่ละกลยุทธ์แสดงดังรูปที่ ก.1-ก.40 ในภาคผนวก ก

กลยุทธ์ที่ 1: Peak shaving control strategy (กำหนดให้ $l = 0.1-1$)

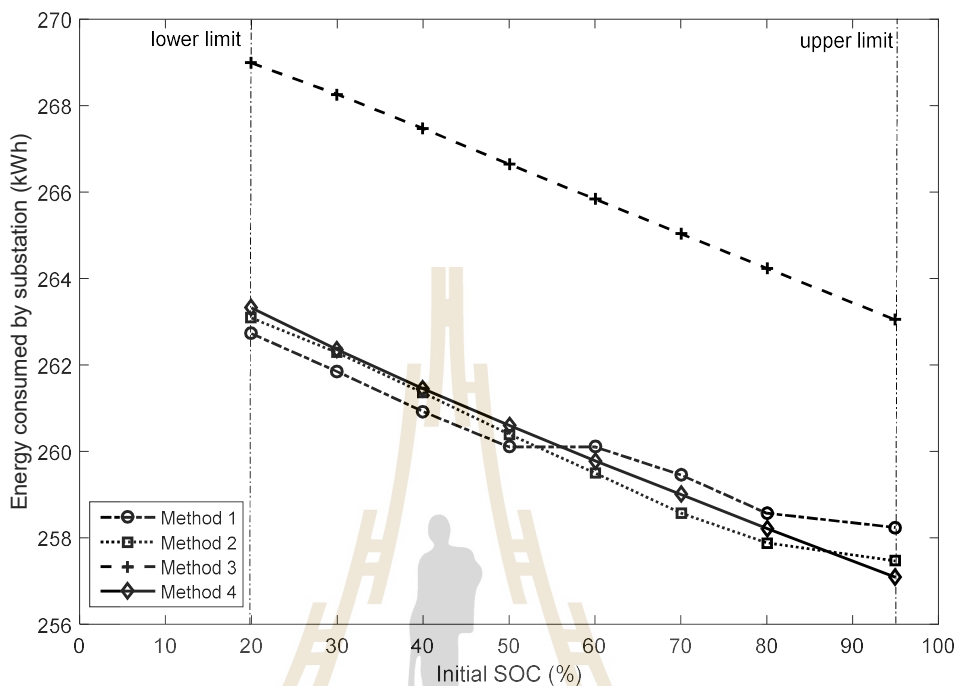
กลยุทธ์ที่ 2: Proportional control strategy (กำหนดให้ $k = 0.1-1$)

กลยุทธ์ที่ 3: State of Charge control strategy (กำหนดให้ $K = 0.1-1$)

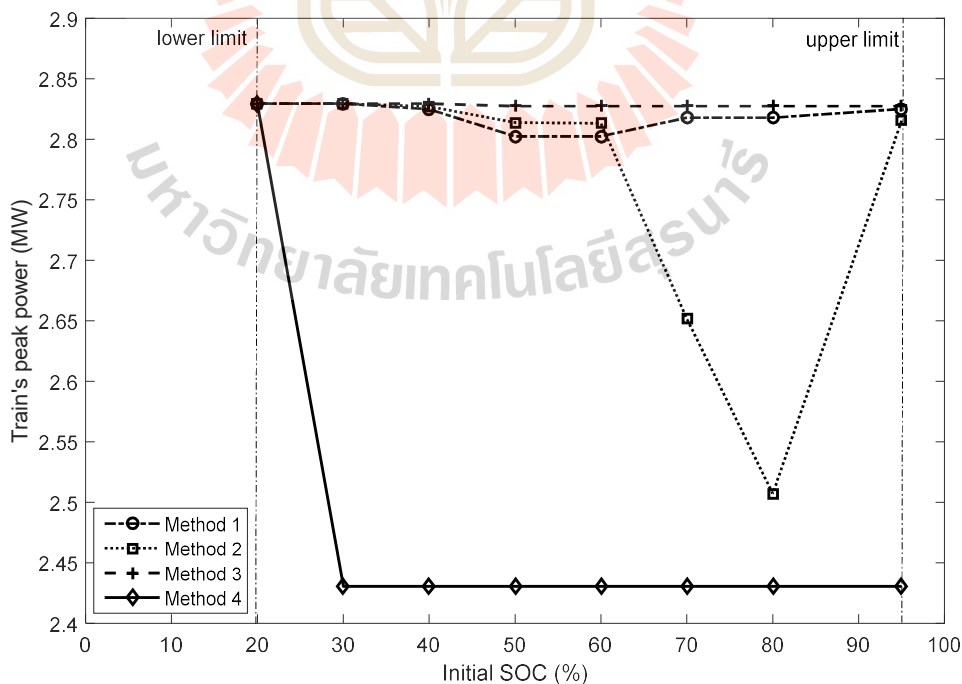
กลยุทธ์ที่ 4: Peak demand cutting strategy (วิธีที่นำเสนอ)

จากการทดสอบทั้ง 4 กลยุทธ์ จะเห็นได้ว่าค่าต่าง ๆ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการแปรค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละกลยุทธ์ ดังนั้นจึงทำการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละกลยุทธ์ที่ให้ค่าการใช้

พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดของแต่ละค่า initial SOC เพื่อนำมาเปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพของแต่ละกลยุทธ์ แสดงดังตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.11-5.20 ตามลำดับ



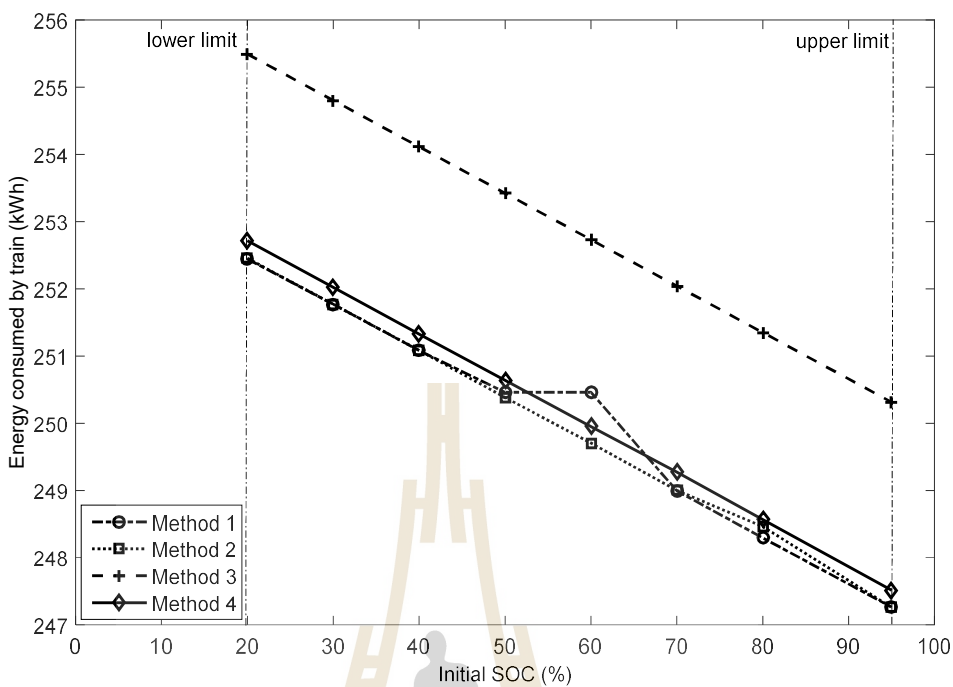
รูปที่ 5.11 ผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน



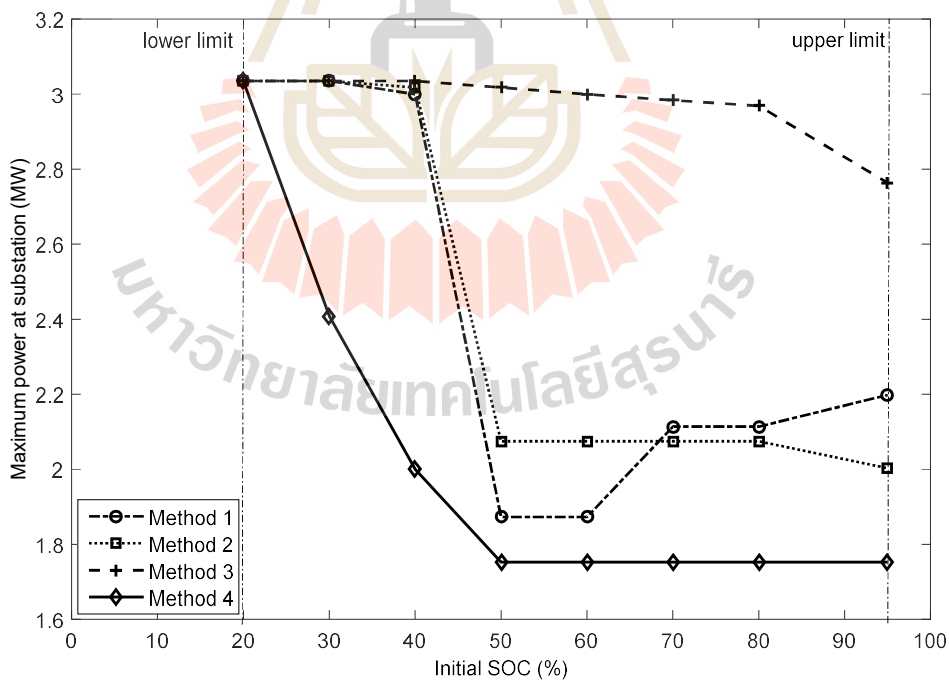
รูปที่ 5.12 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟ

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของกลยุทธ์การลดกำลังไฟฟ้าขายของแต่ละกลยุทธ์

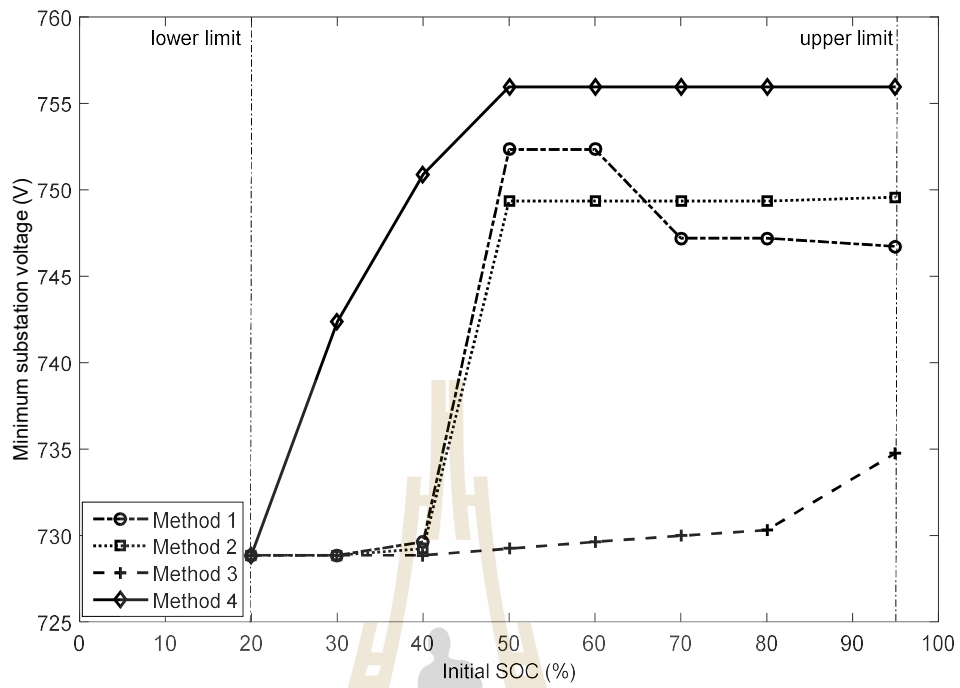
กลยุทธ์ที่	SOC_{start}	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{sub,max}$ (MW)	$P_{tr,max}$ (MW)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)
ฐาน	-	297.02	282.05	14.97	68.70	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
1	20	262.73	252.45	10.28	2.03	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
	30	261.84	251.77	10.07	2.05	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
	40	260.92	251.08	9.84	2.05	3.00	2.82	729.63	621.10	130.37	12.43
	50	260.10	250.46	9.64	2.15	1.87	2.80	752.33	656.45	95.10	7.13
	60	260.10	250.46	9.64	3.15	1.87	2.80	752.33	656.45	95.10	7.13
	70	259.45	248.99	10.46	2.03	2.11	2.82	747.20	655.75	95.59	6.63
	80	258.57	248.29	10.27	2.02	2.11	2.82	747.20	655.75	95.59	6.63
2	95	258.24	247.26	10.97	2.03	2.20	2.83	746.72	655.75	95.59	6.79
	20	263.09	252.45	10.63	2.04	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
	30	262.28	251.77	10.51	2.05	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
	40	261.35	251.08	10.27	2.06	3.02	2.83	729.24	617.56	133.13	12.67
	50	260.40	250.38	10.01	2.04	2.07	2.81	749.35	655.75	95.59	8.57
	60	259.50	249.70	9.79	2.06	2.07	2.81	749.35	655.76	95.58	8.57
	70	258.57	249.00	9.57	2.04	2.07	2.65	749.35	665.64	90.24	8.57
3	80	257.88	248.46	9.42	2.26	2.07	2.51	749.35	673.13	90.24	8.57
	95	257.46	247.26	10.20	2.02	2.00	2.82	749.57	655.75	95.59	7.32
	20	268.99	255.49	13.50	6.44	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
	30	268.26	254.80	13.46	6.44	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
	40	267.47	254.11	13.36	6.44	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
	50	266.65	253.42	13.22	6.44	3.02	2.83	729.24	617.56	133.13	12.67
	60	265.84	252.73	13.11	6.44	3.00	2.83	729.63	621.05	130.41	12.43
4	70	265.04	252.04	13.00	6.44	2.98	2.83	729.98	624.40	127.79	12.22
	80	264.24	251.35	12.89	6.44	2.97	2.83	730.31	627.47	125.40	12.01
	95	263.04	250.31	12.73	6.44	2.76	2.83	734.77	639.61	116.03	11.12
	20	263.32	252.71	10.61	2.42	3.03	2.83	728.85	614.21	135.73	12.89
	30	262.35	252.02	10.33	2.42	2.41	2.43	742.38	649.75	108.33	10.24
	40	261.45	251.33	10.12	2.41	2.00	2.43	750.89	673.30	90.15	8.50
	50	260.60	250.64	9.96	2.42	1.75	2.43	755.96	680.80	77.75	7.06
60	259.78	249.95	9.83	2.42	1.75	2.43	755.96	680.80	77.75	5.99	
4	70	259.01	249.27	9.73	2.43	1.75	2.43	755.96	680.80	77.75	5.99
	80	258.22	248.57	9.65	2.41	1.75	2.43	755.96	680.80	77.75	5.99
4	95	257.08	247.52	9.57	2.39	1.75	2.43	755.96	680.80	77.75	5.99



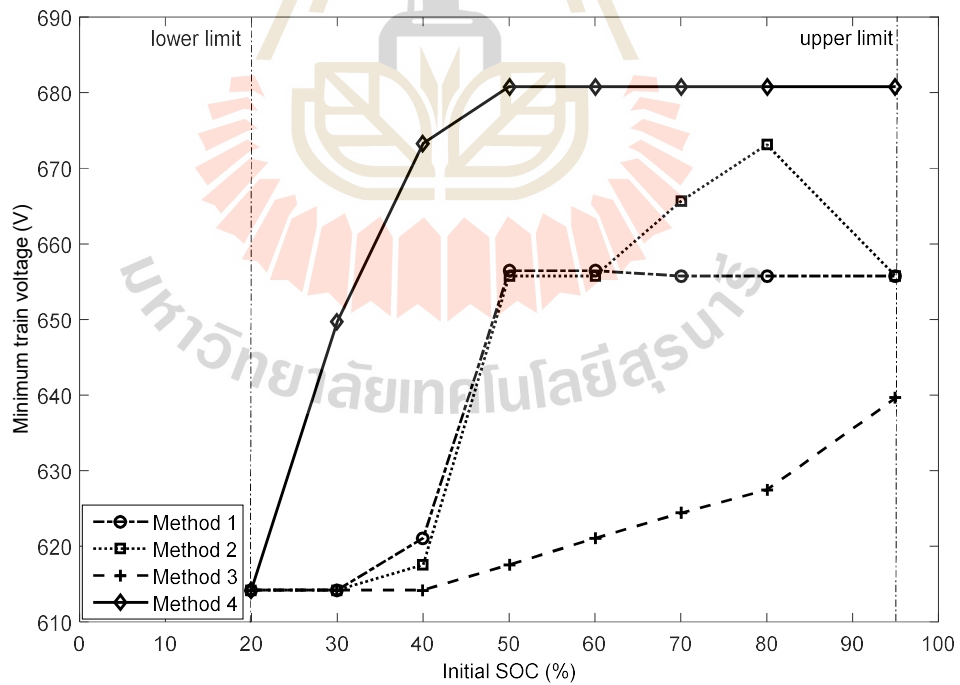
รูปที่ 5.13 ผลการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้า



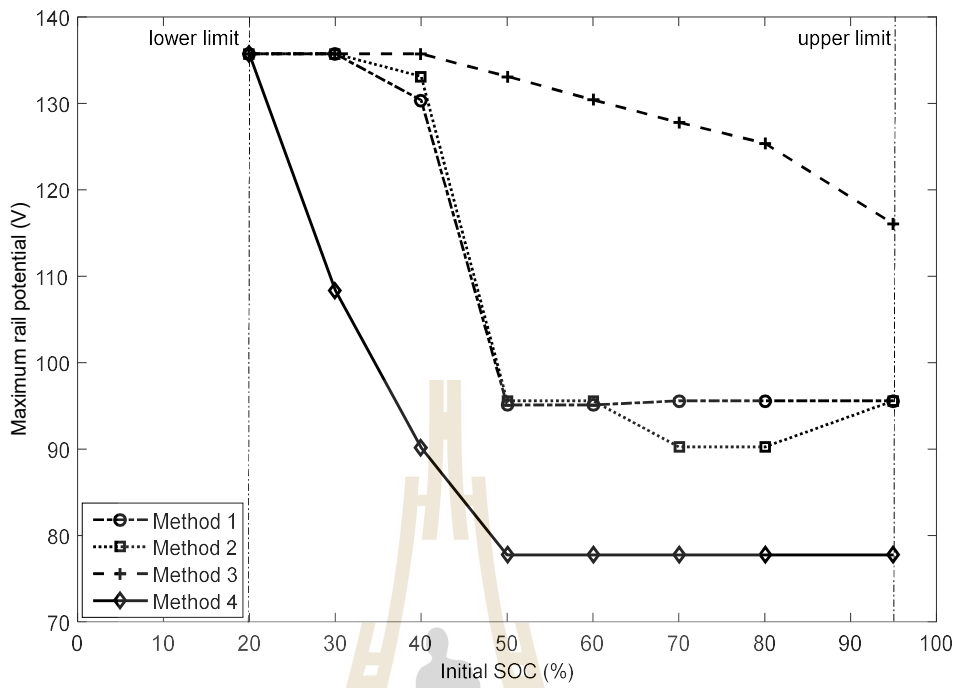
รูปที่ 5.14 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน



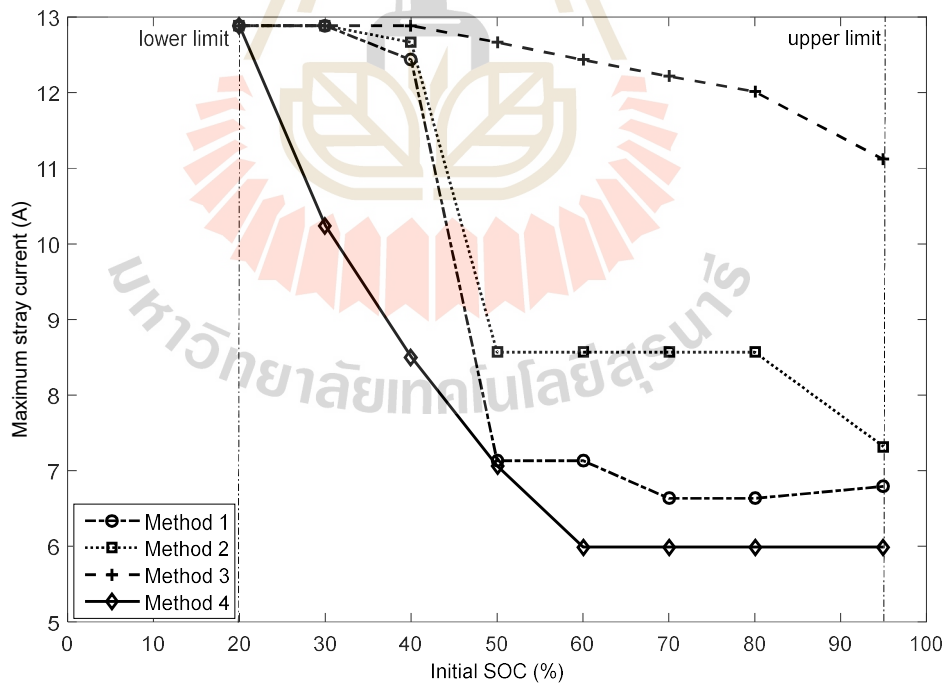
รูปที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำสุด



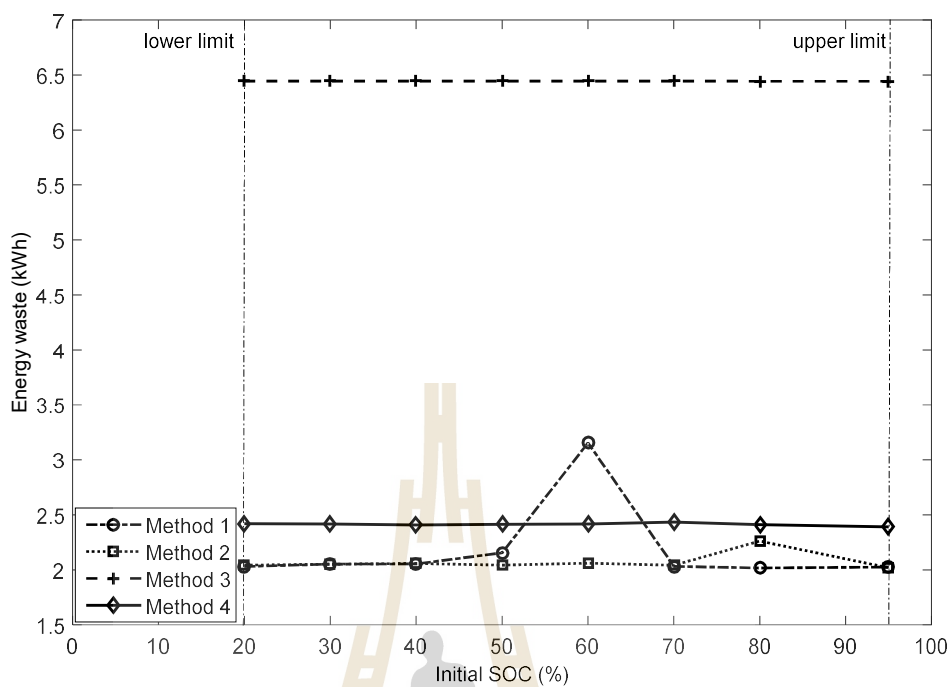
รูปที่ 5.16 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุด



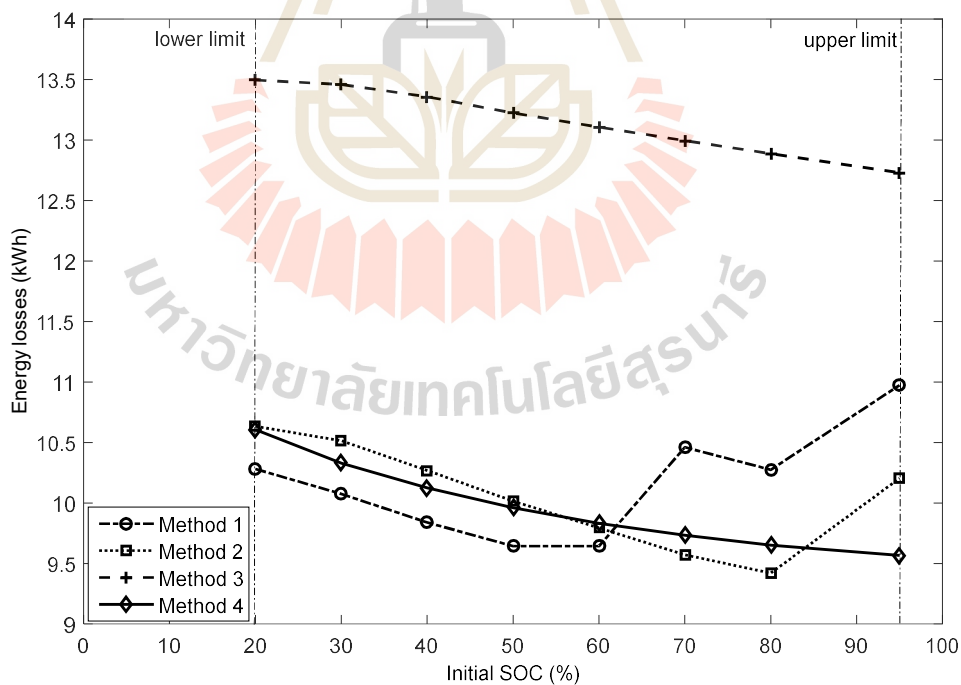
รูปที่ 5.17 ผลการเปรียบเทียบแรงดันรางสูงสุด



รูปที่ 5.18 ผลการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุด



รูปที่ 5.19 ผลการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก



รูปที่ 5.20 ผลการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวม

จากผลการทดสอบเปรียบเทียบกลยุทธ์การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดทั้ง 4 กลยุทธ์ พบว่า กลยุทธ์ที่ 1, 2 และ 4 (กลยุทธ์ที่นำเสนอ) สามารถช่วยทำให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้เคลื่อนที่ลดลงใกล้เคียงกันตามการเพิ่มขึ้นของค่า SOC เริ่มต้น ดังรูปที่ 5.11 และ 5.13 ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟฟ้า กลยุทธ์ที่ 4 จะให้ผลลัพธ์ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลยุทธ์อื่น แสดงดังรูปที่ 5.12 รูปที่ 5.14-5.18 แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำสุด แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุด แรงดันรางสูงสุดและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุด ตามลำดับ พบว่า กลยุทธ์ที่ 4 จะให้ผลลัพธ์ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลยุทธ์อื่น รูปที่ 5.19 และ 5.20 แสดงผลการเปรียบเทียบพลังงานสูญเสียในตัวต้านทานการเบรกและพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวม ตามลำดับ พบว่ากลยุทธ์ที่ 1, 2 และ 4 ให้ผลลัพธ์เป็นไปในแนวทางเดียวกันที่ดีกว่ากลยุทธ์ที่ 3 อย่างชัดเจน ดังนั้นจากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ากลยุทธ์ที่ 4 หรือกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด ซึ่งเป็นกลยุทธ์ที่นำเสนอ นั้นเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรกและได้ผลลัพธ์ตามวัตถุประสงค์ คือ ให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของการลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟในช่วงเร่ง

5.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอกลยุทธ์การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบเก็บสะสมพลังงานบนขบวนรถจากงานวิจัยที่ผ่านมา 3 วิธี ได้แก่ กลยุทธ์ควบคุมการตัดค่ายอดของกำลังไฟฟ้า กลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วนและกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ รวมทั้งนำเสนอกลยุทธ์การตัดความต้องการไฟฟ้าค่ายอด ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมาเอง ทดสอบและเปรียบเทียบกลยุทธ์ที่นำเสนอกับกลยุทธ์จากงานวิจัยที่ผ่านมาด้วยระบบรถไฟฟ้า BTS สายสีลม โดยจากผลการทดสอบและเปรียบเทียบสรุปได้ว่ากลยุทธ์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้จัดการพลังงานคืนกลับจากเบรกได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การประยุกต์ใช้กลยุทธ์ที่นำเสนอกับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 6

การประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน

6.1 บทนำ

จากบทที่ 5 ได้กล่าวถึงการจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรกร่วมกับ OBESS โดยนำเสนอกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด เป็นกลยุทธ์ที่มีความเหมาะสมและประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับกลยุทธ์อื่น ๆ ที่นำเสนอ โดยบทนี้จะนำเสนอการทดสอบและผลการทดสอบการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนร่วมกับ OBESS โดยใช้กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด (Sumpavakup, Ratniyomchai and Kulworawanichpong, 2017) อีกทั้งนำเสนอกรณีศึกษาการเดินทางวิ่งโดยใช้แหล่งจ่ายไฟจาก OBESS ดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.2 การกำหนดปัญหาการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุด

6.2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การจำลองผลการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ จะกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าการประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยรวมที่ใช้ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (ϕ) ต้องมากที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ดังสมการที่ (6.1)

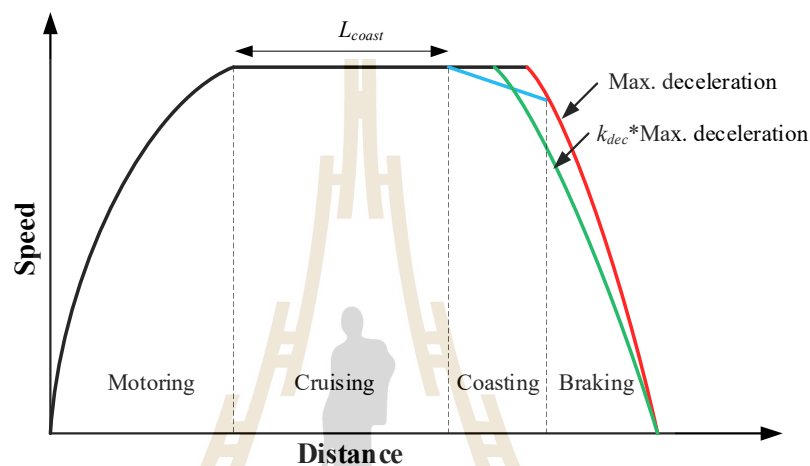
$$\text{Maximize } \phi = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{TSS}} E_{sub,i}^{ess}}{\sum_{i=1}^{N_{TSS}} E_{sub,i}^{noess}} \right) \quad (6.1)$$

โดยที่ $E_{sub,i}^{ess}$ และ $E_{sub,i}^{noess}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน i ของกรณีติดตั้ง OBESS และไม่ได้ติดตั้ง OBESS ตามลำดับ และ N_{TSS} คือ จำนวนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

6.2.2 ตัวแปรควบคุม

ตัวแปรควบคุมใช้สำหรับหาค่ามากที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่ จำนวนมอดูลของ (N_{ESS}) SOC เริ่มต้นของ OBESS (SOC_{start}) ตัวปรับคูณของการ

ควบคุมการเบรก (gain of deceleration control; k_{dec}) และจุดเริ่ม โหมดการแล่น (coasting point; L_{coast}) ซึ่ง k_{dec} และ L_{coast} จะใช้สำหรับการควบคุมเวลาที่รถไฟฟ้าใช้วิ่งจากจุดหนึ่งไปจุดสุดท้าย (trip time) โดยการควบคุม trip time แบ่งเป็น 3 วิธี คือ การควบคุมการเบรกผ่านตัวปรับคูณ k_{dec} การควบคุมจุดเริ่ม โหมดการแล่นผ่าน L_{coast} และการควบคุมการเบรกร่วมกับการควบคุมจุดเริ่ม โหมดการแล่นผ่าน k_{dec} ร่วมกับ L_{coast} ลักษณะการควบคุมแต่ละวิธีแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ลักษณะ โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าผ่านการควบคุม trip time แต่ละวิธี

6.2.3 เงื่อนไขบังคับ

เงื่อนไขบังคับการหาค่าเหมาะที่สุดแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เงื่อนไขบังคับอสมการ (inequality constraint) และเงื่อนไขบังคับสมการ (equality constraint) รายละเอียดดังนี้

เงื่อนไขบังคับอสมการ:

$$SOC_{limit}^{lower} \leq SOC \leq SOC_{limit}^{upper} \quad (6.2)$$

$$N_{ESS}^{min} \leq N_{ESS} \leq N_{ESS}^{max} \quad (6.3)$$

$$P_{ESS}^{min} \leq P_{ESS} \leq P_{ESS}^{max} \quad (6.4)$$

$$k_{dec}^{min} \leq k_{dec} \leq k_{dec}^{max} \quad (6.5)$$

$$L_{coast}^{\min} \leq L_{coast} \leq L_{coast}^{\max} \quad (6.6)$$

โดยที่ SOC_{limit}^{lower} และ SOC_{limit}^{upper} คือ ขีดจำกัดล่างและบนของ SOC

N_{ESS}^{\min} และ N_{ESS}^{\max} คือ ขีดจำกัดน้อยที่สุดและมากที่สุดของจำนวนมอดูลของ OBESS

P_{ESS}^{\min} และ P_{ESS}^{\max} คือ ขีดจำกัดน้อยที่สุดและมากที่สุดของกำลังไฟฟ้าของ OBESS

k_{dec}^{\min} และ k_{dec}^{\max} คือ ขีดจำกัดน้อยที่สุดและมากที่สุดของตัวปรับคุณภาพการควบคุมการเบรก

L_{coast}^{\min} และ L_{coast}^{\max} คือ ขีดจำกัดน้อยที่สุดและมากที่สุดของจุดเริ่มโหมดการแล่น

เงื่อนไขบังคับสมการ:

$$T_{trip} = T_{trip}^{nominal} \quad (6.7)$$

$$SOC_{max} = SOC_{limit}^{upper} \quad (6.8)$$

$$SOC_{end} = SOC_{start} \quad (6.9)$$

โดยที่ T_{trip} คือ เวลาที่รถไฟฟ้าใช้วิ่งจากจุดหนึ่งไปจุดสุดท้าย (วินาที)

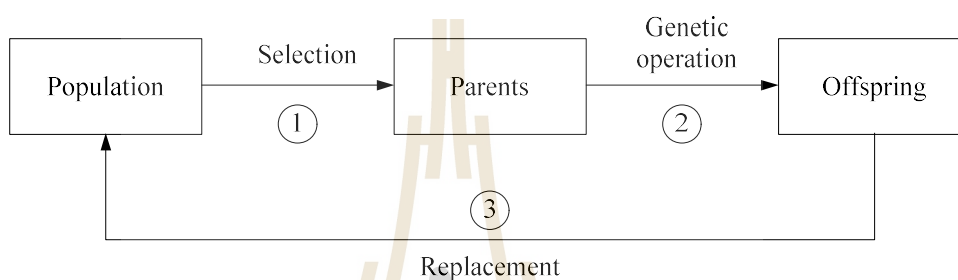
SOC_{max} และ SOC_{end} คือ ค่า SOC มากที่สุดและค่า SOC สุดท้าย

ในงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) มาช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรควบคุมสำหรับค่าการประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยรวมที่ใช้ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุดในเส้นทางวิ่งที่นำเสนอ

6.3 ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม

ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรมหรือที่เรียกโดยย่อว่า GA ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 60 โดยจำลองเอาแนวคิดของการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยามาใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ (อาทิตย์, 2552) GA เป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนการค้นหาคำตอบ และได้รับกสนจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary computing) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

วัฏจักรของ GA โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 (อาทิตย์, 2552) ได้แก่ 1) การคัดเลือกสายพันธุ์ (selection) คือ ขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบ ไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป 2) ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (genetic operation) คือ วิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีทางสายพันธุ์ โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 วิธี คือ การทำครอสโอเวอร์ (crossover) และการทำมิวเทชัน (mutation) 3) การแทนที่ (replacement) คือ ขั้นตอนการนำเอาลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน

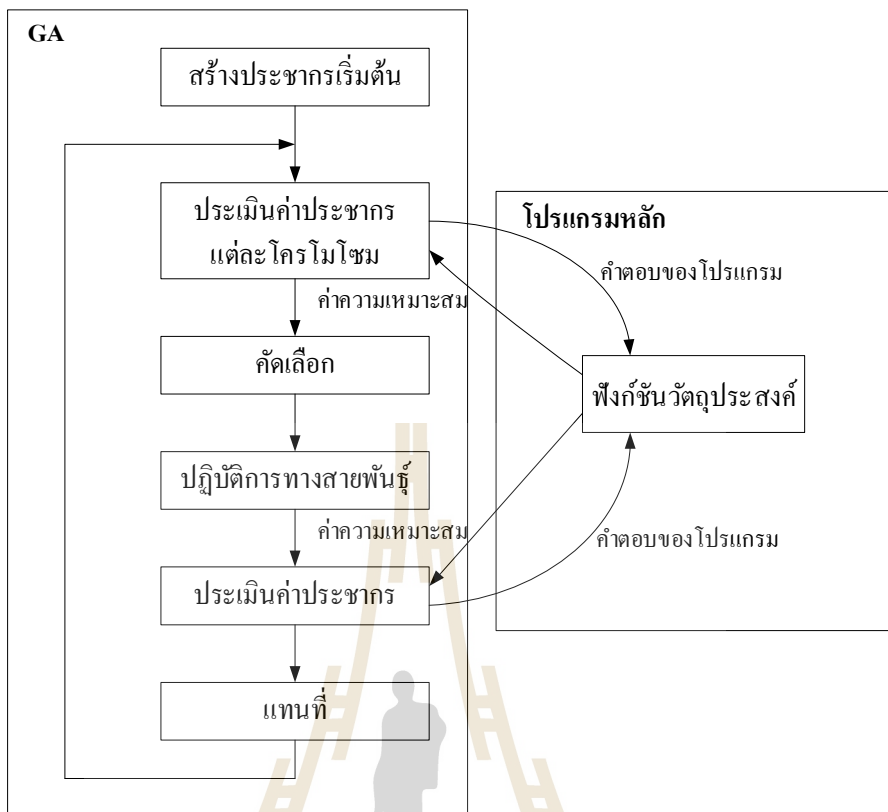


รูปที่ 6.2 วัฏจักรของ GA

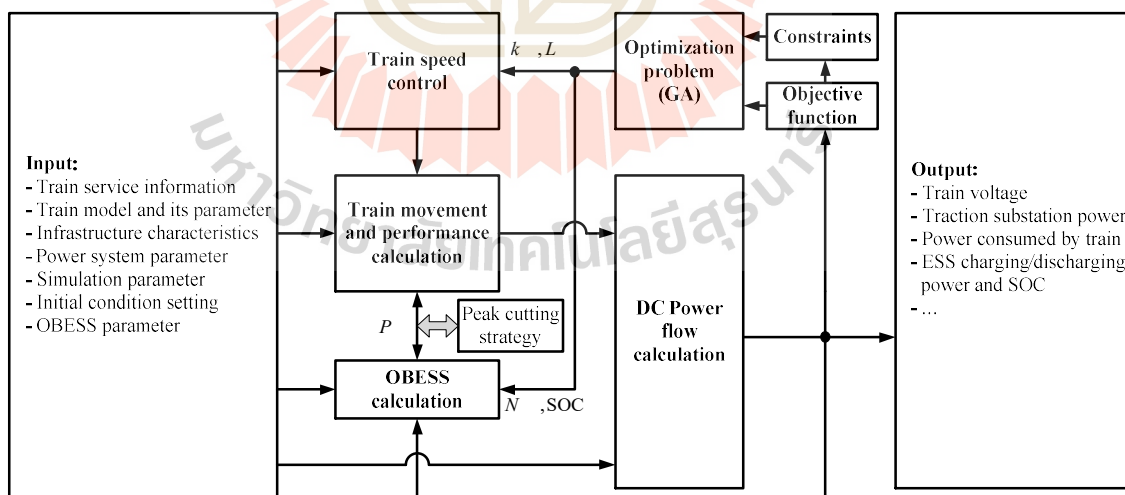
จากรูปที่ 6.2 ประชากร (population) ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม (chromosome) ซึ่งเป็นตัวแทนของคำตอบในระบบที่ต้องการค้นหา ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (parents) นั้นคือกลุ่มประชากรที่ถูกคัดเลือกเพื่อเป็นตัวแทนในการให้กำเนิดสายพันธุ์ใหม่ในรุ่นถัดไป (next generation) ส่วนสายพันธุ์ใหม่ (offspring) หรือลูกหลาน เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่ โดยคาดหวังที่จะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเพื่อถ่ายทอดต่อกันในประชากรรุ่นถัดไป กระบวนการภายในของ GA ทำให้คำตอบของระบบที่มีอยู่เกิดวิวัฒนาการในตัวเองอันจะนำไปสู่การปรับตัวให้กลายเป็นคำตอบที่ดีกว่าและดีที่สุดได้ ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของ GA กับการเชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรมหลักแสดงดังรูปที่ 6.3 และแผนภาพการทำงานของโปรแกรมหลักเพื่อการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด แสดงดังรูปที่ 6.4

6.4 ระบบทดสอบ

การทดสอบจะนำมาทดสอบกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนของประเทศไทย ได้แก่ รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ดังรูปที่ 5.10 รายละเอียดพารามิเตอร์และเงื่อนไขสำหรับการจำลองผลเหมือนตารางที่ 5.1 ในบทที่ 5 ต่างกันเพียงแค่จำนวนมอดูลของ OBESS นั้นหามาจากการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม



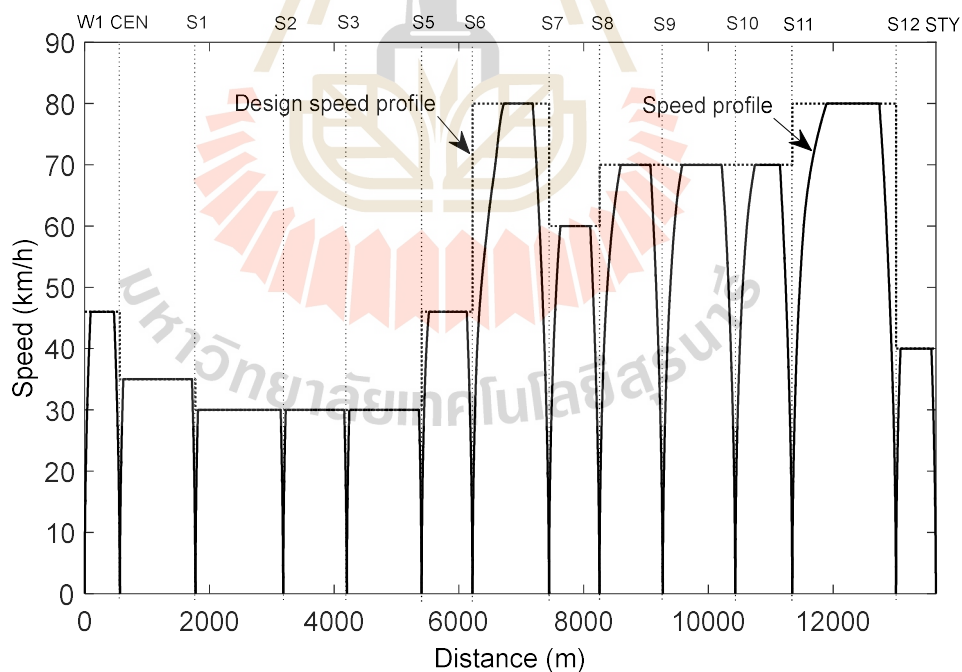
รูปที่ 6.3 ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของ GA กับการเชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรมหลัก



รูปที่ 6.4 การทำงานของโปรแกรมหลักเพื่อการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด

6.5 การทดสอบ

ในการจำลองผลกำหนดให้มีขบวนรถไฟให้บริการ 1 ขบวน วิ่งจากสถานี W1 ไป STY รวมระยะทางทั้งสิ้น 13.649 กิโลเมตร กำหนดเส้น โครงความเร็วในการวิ่งของรถไฟฟ้าดังรูปที่ 6.5 ซึ่งความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 80 km/h และใช้กลยุทธ์การตัดความต้องการไฟฟ้าค่ายอดที่นำเสนอในบทที่ 5 การจำลองผลแบ่งเป็น 3 กรณี ดังตารางที่ 6.1 โดยทำการควบคุม trip time ในช่วงที่ความเร็วสูงสุดมากกว่าหรือเท่ากับ 60 km/h เท่านั้น นั่นก็คือจากสถานี S6 ถึง สถานี S12 เพราะว่าช่วงเวลาของการควบคุมกว้างกว่าช่วงที่ความเร็วต่ำกว่า 60 km/h เพื่อประเมินตัวแปรควบคุมว่าจะมีค่าเท่าใดที่จะทำให้ประหยัดพลังงานมากที่สุดภายใต้การควบคุม trip time 3 วิธี ได้แก่ การควบคุมผ่าน k_{dec} (ถ้าไม่อยู่ในช่วงที่พิจารณา k_{dec} จะมีค่าเท่ากับ 1) การควบคุมผ่าน L_{coast} (ถ้าไม่อยู่ในช่วงที่พิจารณา L_{coast} จะมีค่าเท่ากับ 2000 เมตร) และการควบคุมผ่าน k_{dec} ร่วมกับ L_{coast} โดยใช้ GA ในการแก้ปัญหา ค่าเหมาะสมที่สุด และเปรียบเทียบกับกรณีฐาน คือ ไม่ได้ติดตั้ง OBESS กำหนดช่วง SOC ทำงานของ OBESS ระหว่าง 20-95% เพื่อยืดอายุการใช้งานของ OBESS ค่าพารามิเตอร์สำหรับการแก้ปัญหา ค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA แสดงดังตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.5 เส้น โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้า BTS สายสีลม กรณีฐาน

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการจำลองผลแต่ละกรณี

กรณี	การติดตั้ง OBESS	การควบคุม trip time
ฐาน	ไม่ได้ติดตั้ง	Max. deceleration
1	ติดตั้ง	$k_{dec} * \text{Max. deceleration}$
2	ติดตั้ง	$L_{coast} + \text{Max. deceleration}$
3	ติดตั้ง	$L_{coast} + k_{dec} * \text{Max. deceleration}$

ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA

ตัวแปรควบคุม	ขอบเขตข้อจำกัดของตัวแปร [Min, Max]
จำนวนมอดูลของ OBESS (N_{ESS})	[8, 14]
ค่า SOC เริ่มต้น (SOC_{start})	[20, 95]
ตัวปรับคุณภาพการควบคุมการเบรก (k_{dec})	[0.8, 1]
จุดเริ่มโหมดการแล่น (L_{coast}) (เมตร)	[200, 2000]
พารามิเตอร์สำหรับวิธี GA	
Generation	Nvar x 20
Population	Nvar x 10
Crossover probability	0.9
Mutation probability	0.1
Function tolerance	1×10^{-6}

หมายเหตุ Nvar คือ จำนวนตัวแปรควบคุม

6.6 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบที่กล่าวข้างต้น ตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดแสดงดังตารางที่ 6.3 ซึ่งจะพบว่าจำนวนมอดูลของ OBESS และค่า SOC เริ่มต้นของ OBESS ในกรณีที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 11 มอดูล และ 44.8% ตามลำดับ โดยกรณีที่ 1 และ 2 ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ 0.13715 หรือ 13.715% และ 0.15248 หรือ 15.248% ตามลำดับ และทั้ง 2 กรณีมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใกล้เคียงกันที่ 0.38356 และ 0.39845 ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ 3 นั้นติดตั้ง OBESS 10 มอดูลและค่า SOC เริ่มต้นของ OBESS เท่ากับ 40.9% ซึ่งเป็นกรณีที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีที่สุดคือ 0.15564 หรือ 15.564% มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.52526 ซึ่งมากกว่ากรณีอื่น เนื่องจากกรณีที่

3 มีตัวแปรควบคุมมากถึง 14 ตัวแปร โดยต่างจากกรณีที่ 1 และ 2 ที่มีตัวแปรควบคุมเพียง 8 ตัวแปร จึงทำให้ผลเฉลยที่ได้จากการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดแต่ละครั้งมีค่าแตกต่างกันมากกว่ากรณีอื่น และทั้ง 3 กรณีมีค่า SOC สูงสุดเท่ากับ 95% และใช้ trip time เท่ากับ 1649 วินาที ผลการทดสอบของแต่ละกรณีแสดงได้ดังนี้

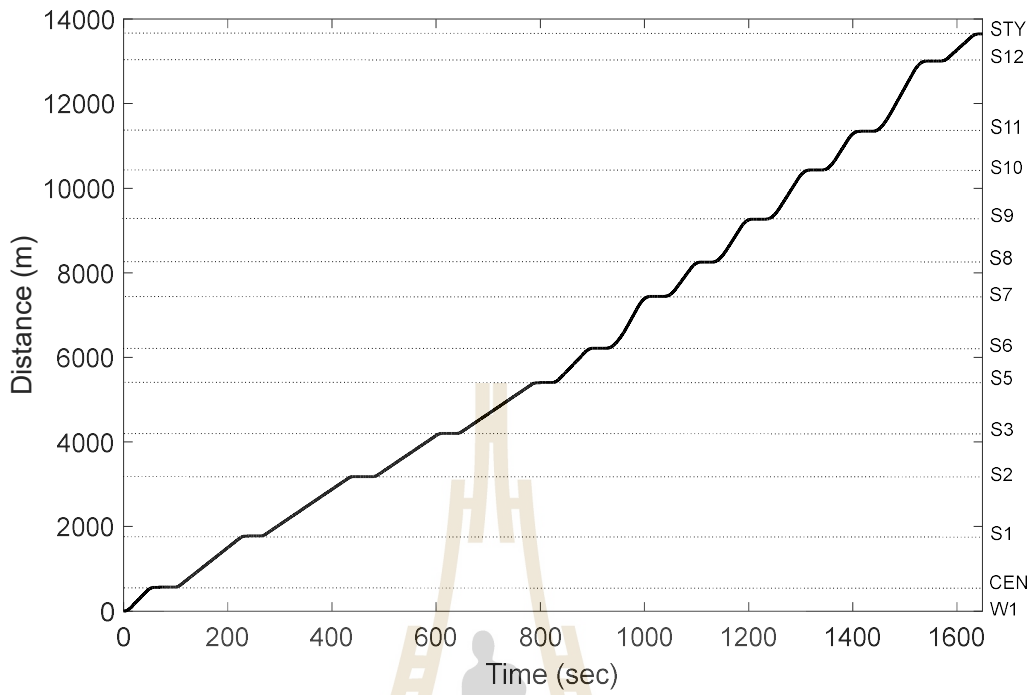
ตารางที่ 6.3 ผลการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรม

พารามิเตอร์	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
จำนวนมอดูลของ OBESS (N_{ESS})	11	11	10
ค่า SOC เริ่มต้น (SOC_{start})	44.8%	44.8%	40.9%
ตัวปรับคุณภาพการควบคุมการเบรก (k_{dec})	$k_{dec,7}=0.80452$ $k_{dec,8}=0.84933$ $k_{dec,9}=0.85840$ $k_{dec,10}=0.92247$ $k_{dec,11}=0.83889$ $k_{dec,12}=0.86245$	-	$k_{dec,7}=0.95216$ $k_{dec,8}=0.94633$ $k_{dec,9}=0.99529$ $k_{dec,10}=0.97604$ $k_{dec,11}=0.98407$ $k_{dec,12}=0.97851$
จุดเริ่มโหมดการแล่น (L_{coast}) (เมตร)	-	$L_{coast,7}=200.00$ $L_{coast,8}=202.89$ $L_{coast,9}=269.95$ $L_{coast,10}=200.68$ $L_{coast,11}=200.00$ $L_{coast,12}=N/A$	$L_{coast,7}=304.72$ $L_{coast,8}=218.39$ $L_{coast,9}=280.00$ $L_{coast,10}=209.32$ $L_{coast,11}=N/A$ $L_{coast,12}=200.00$
ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ϕ)	0.13715	0.15248	0.15564
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	0.38356	0.39845	0.52526

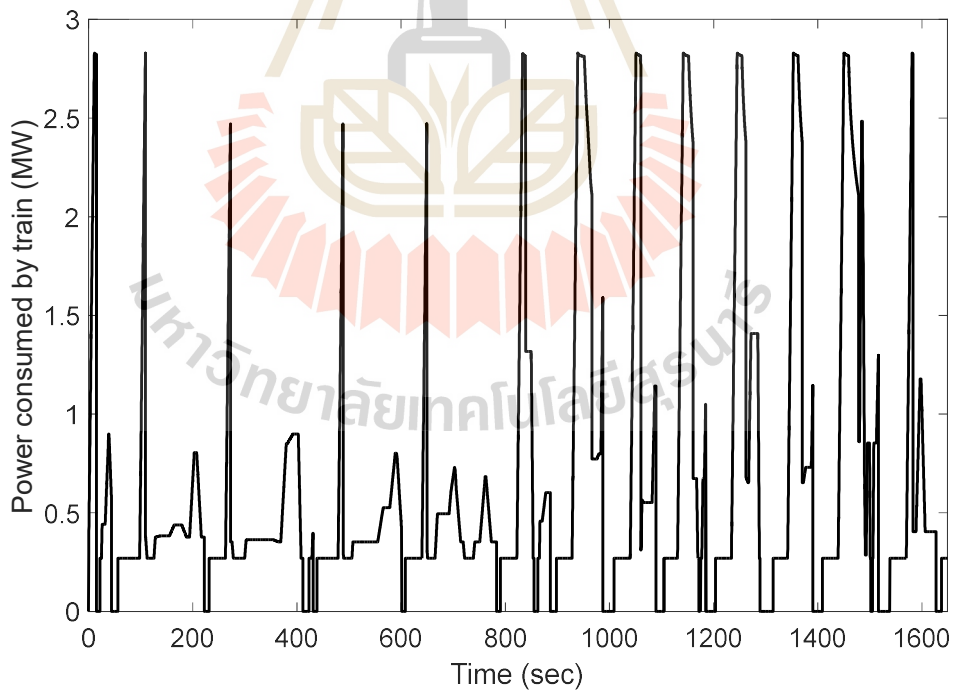
หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่มี coasting

6.6.1 ผลการทดสอบกรณีฐาน (ไม่ได้ติดตั้ง OBESS)

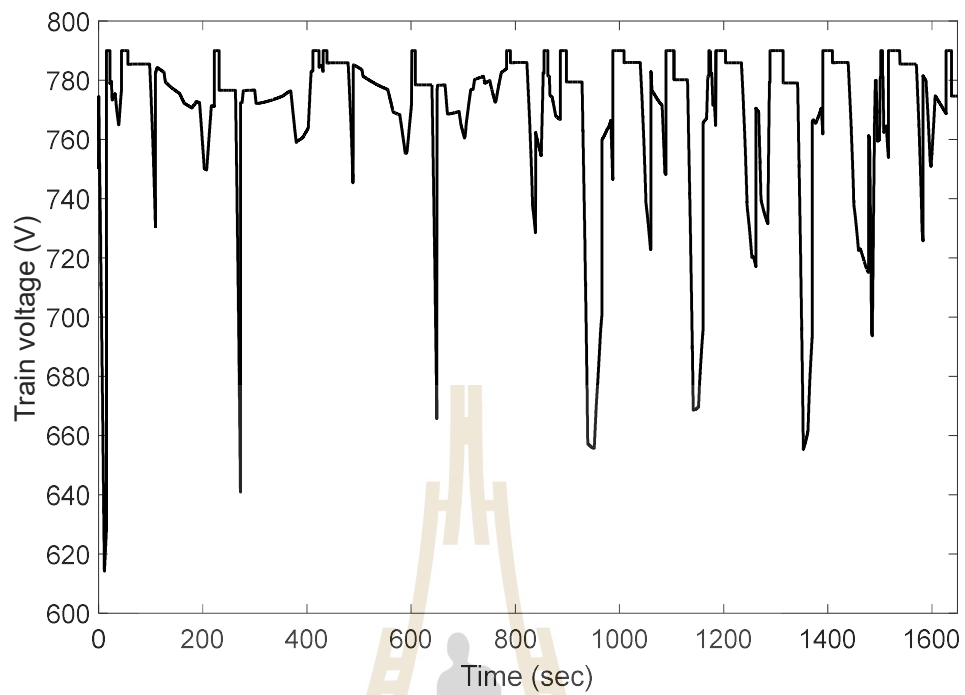
ผลการทดสอบของกรณีที่ไม่ได้ติดตั้ง OBESS (กรณีฐาน) นำเสนอเส้นโค้งเวลา-ระยะทาง กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่และแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวม แรงดันไฟฟ้าที่ราง กระแสไฟฟ้าวัดไหล แสดงดังรูปที่ 6.6 – 6.14



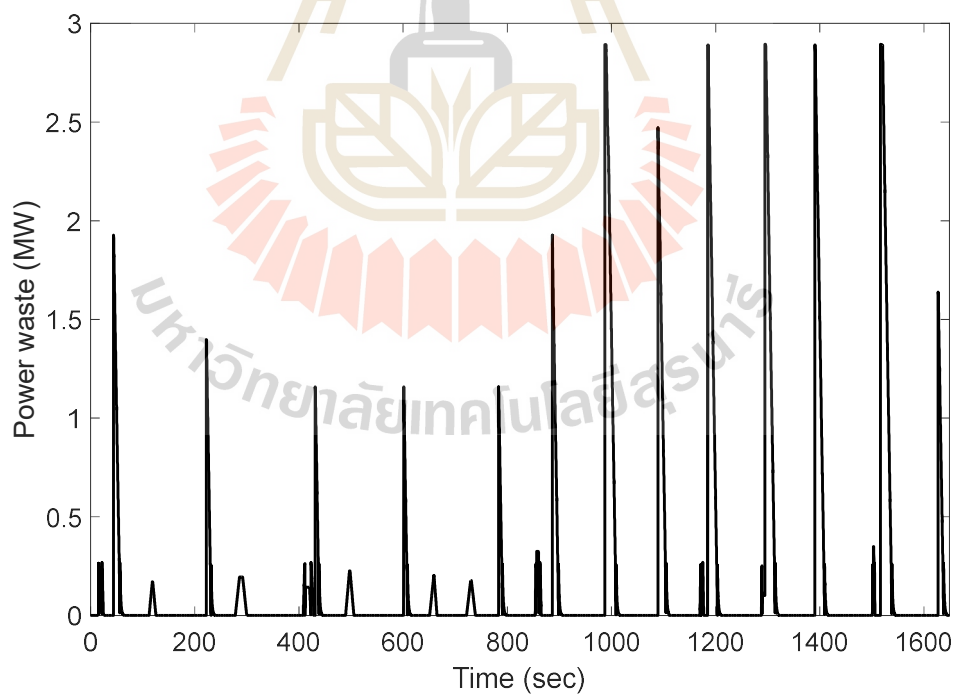
รูปที่ 6.6 เส้น โคงเวลา-ระยะทาง กรณีฐาน



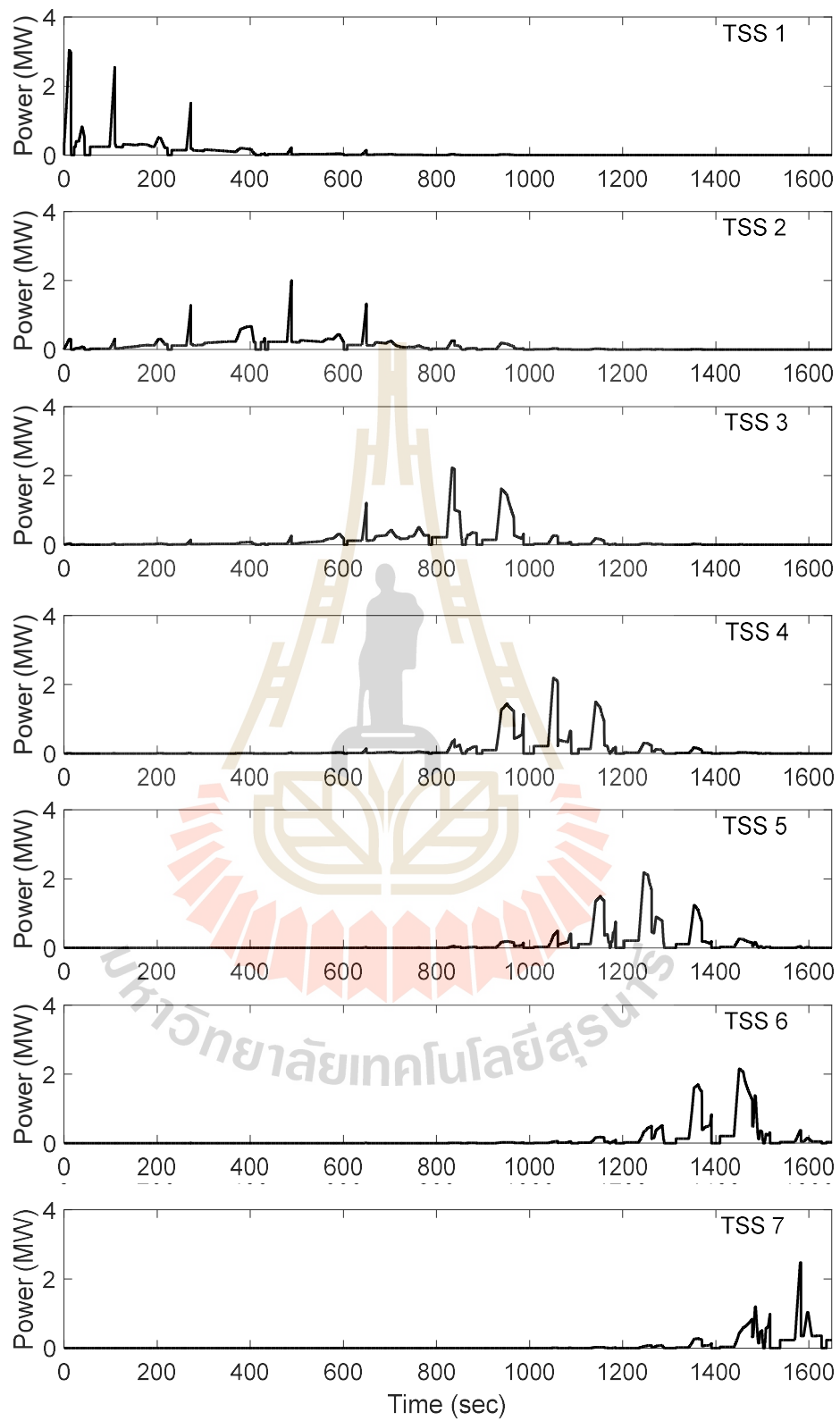
รูปที่ 6.7 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ กรณีฐาน



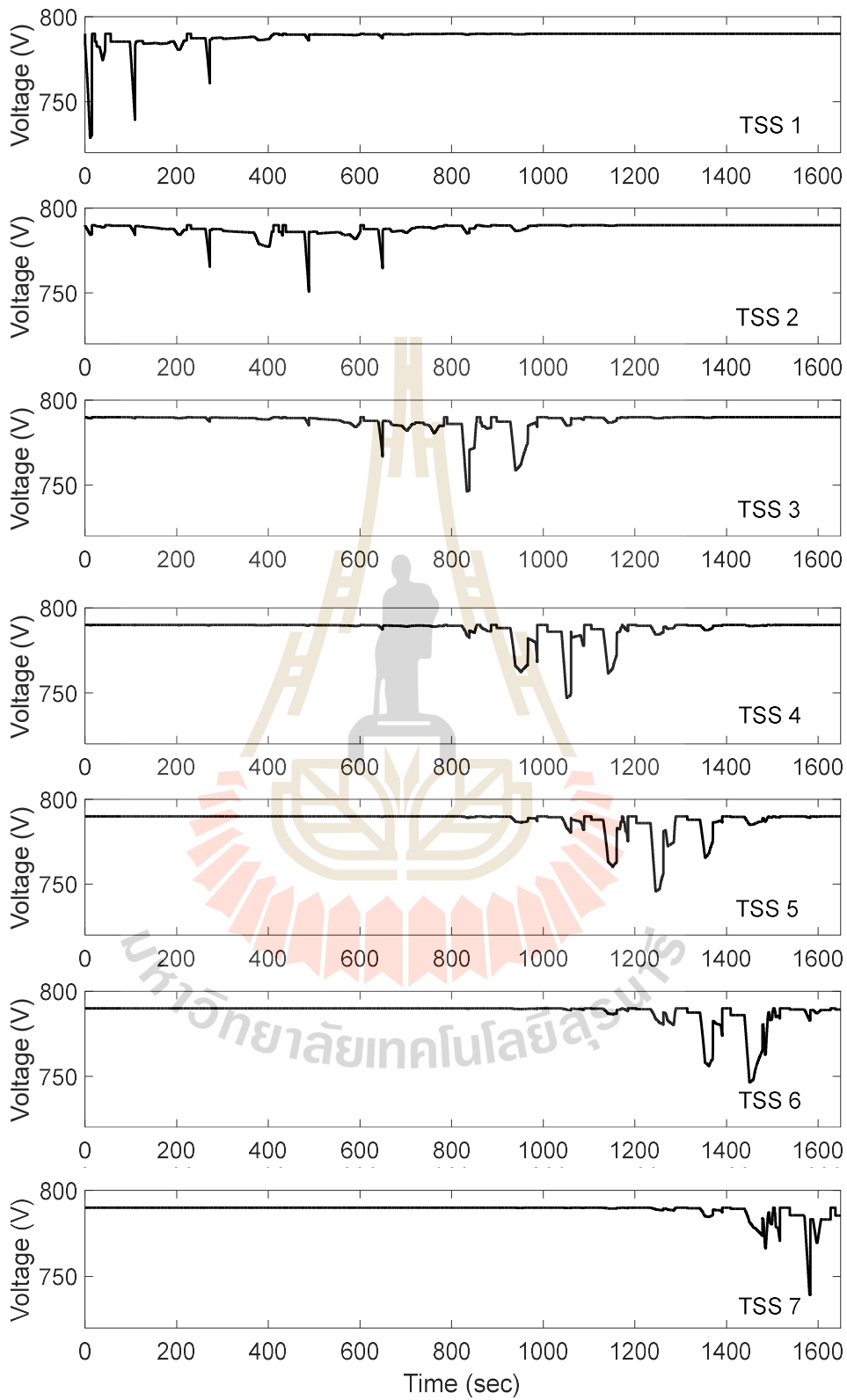
รูปที่ 6.8 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า กรณีฐาน



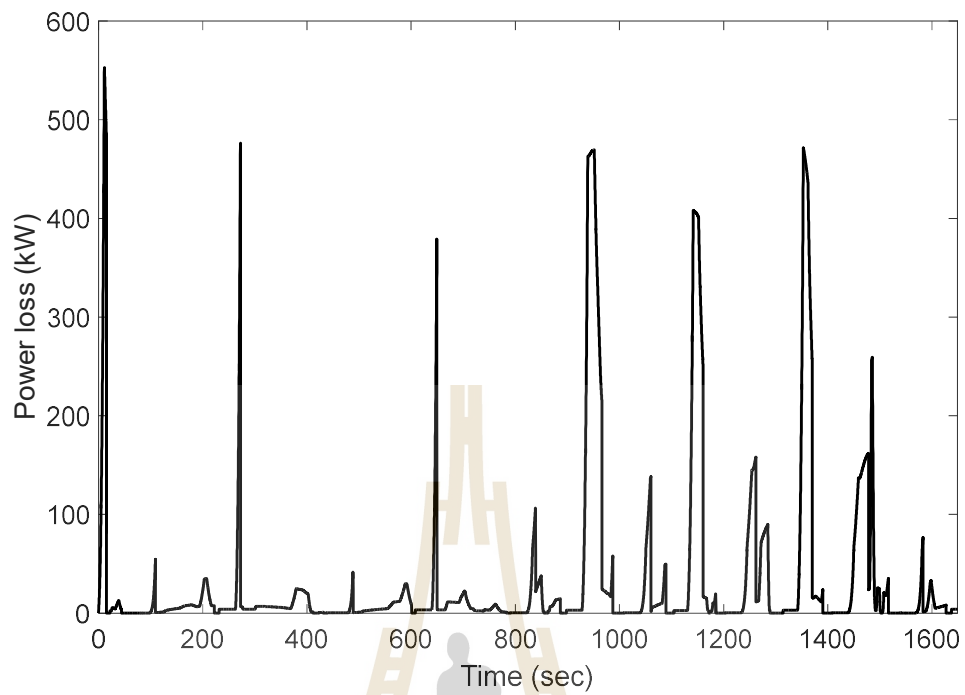
รูปที่ 6.9 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก กรณีฐาน



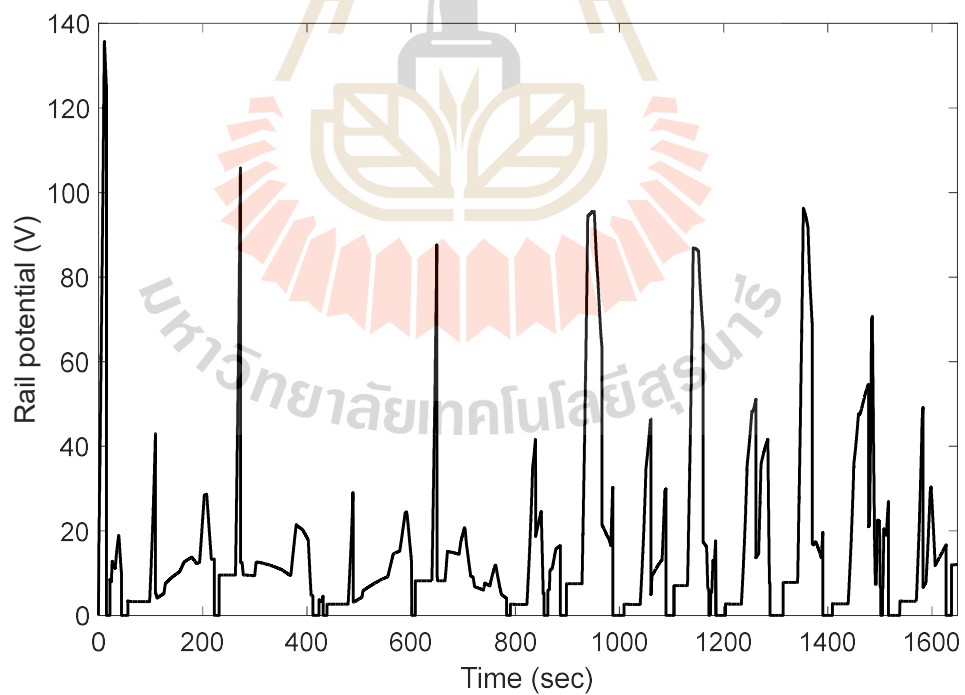
รูปที่ 6.10 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีฐาน



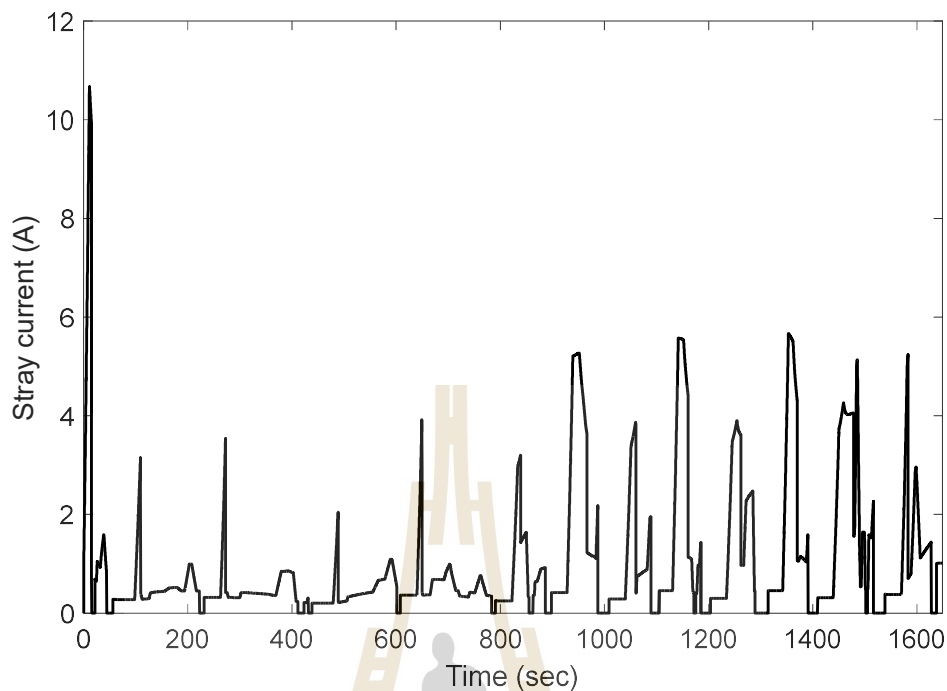
รูปที่ 6.11 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กรณีฐาน



รูปที่ 6.12 กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวม กรณีฐาน



รูปที่ 6.13 แรงดันไฟฟ้าที่ราง กรณีฐาน

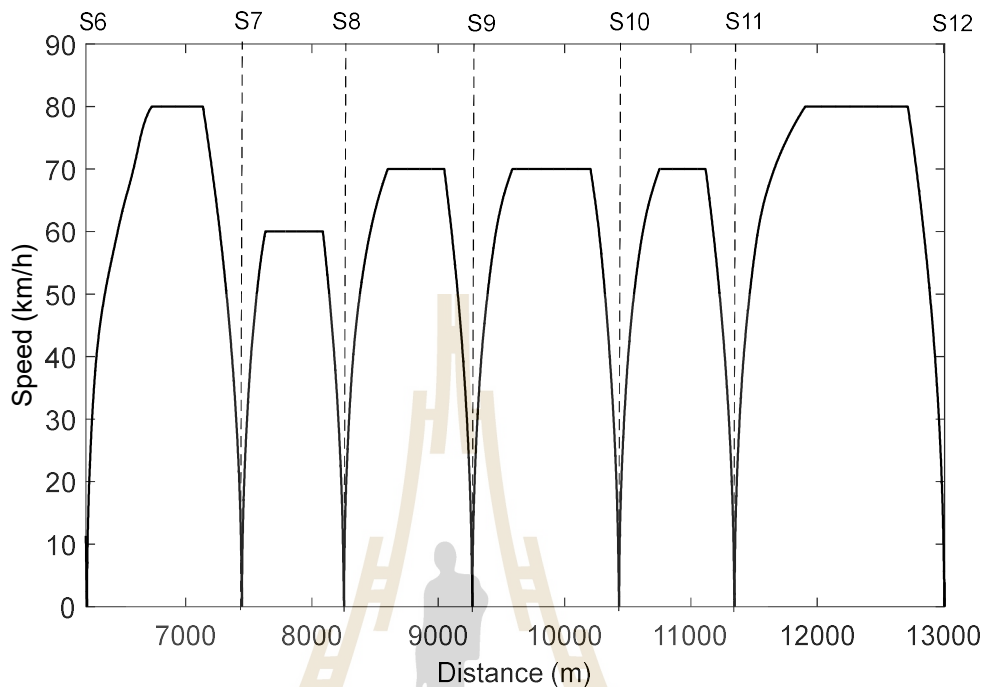


รูปที่ 6.14 กระแสไฟฟ้ารั่วไหล กรณีฐาน

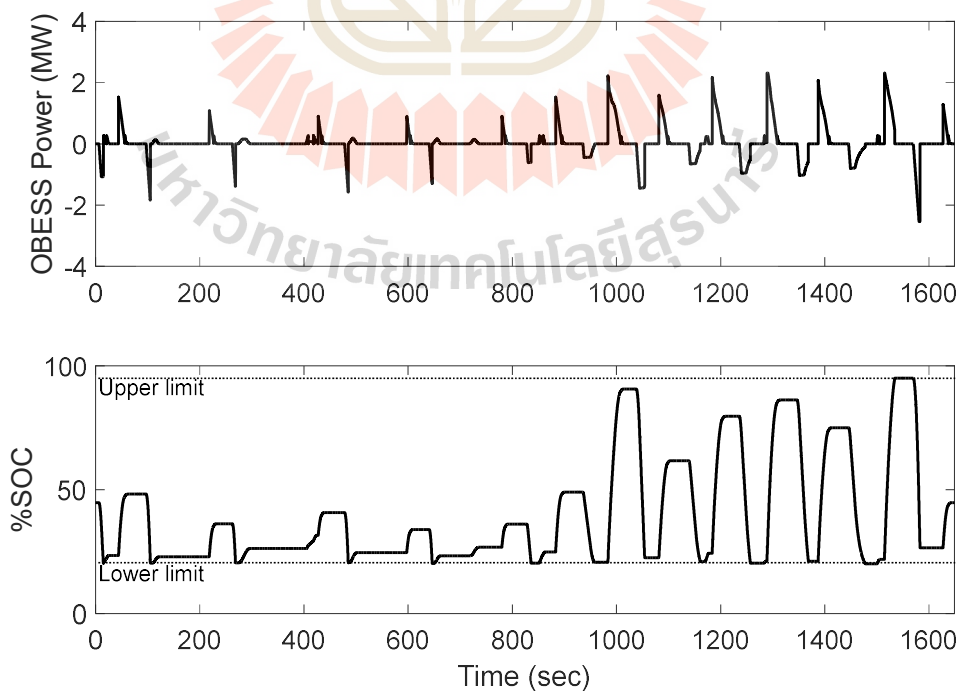
ผลการทดสอบกรณีฐานแสดงดังรูปที่ 6.6-6.14 รูปที่ 6.6 แสดงเส้นโค้งเวลา-ระยะทางจากสถานี W1-STY จากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อไม่ได้ทำการติดตั้ง OBESS ในรถไฟฟ้า จะทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามีค่าสูงในช่วงเร่งออกตัวจากสถานี ดังรูปที่ 6.7 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าก็จะตกลงมากในช่วงดังกล่าวเช่นกัน ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะตกลงมากที่สุดคือ ช่วงเร่งออกตัวจากสถานี W1 เป็นผลเนื่องมาจากที่สถานีนี้ไม่ใช่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังรูปที่ 6.8 เนื่องจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นชนิดตัวเรียงกระแส ดังนั้นกำลังไฟฟ้าคืนกลับจึงไม่สามารถไหลย้อนกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังได้ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกเกิดจากกำลังไฟฟ้าคืนกลับที่เกิดขึ้นขณะเดินรถจะไหลไปที่ตัวต้านทานเบรกเพื่อกำจัดทิ้งในรูปของความร้อน แสดงดังรูปที่ 6.9 รูปที่ 6.10 และ 6.11 แสดงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงที่รถไฟฟ้าวิ่งผ่านสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนั้น ๆ กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมคำนวณจากสมการสมดุลกำลังไฟฟ้า (power balance equation) คือ กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนลบด้วยกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับรถไฟฟ้า ($\sum_{i=1}^7 P_{TSS,i} - P_r$) แสดงดังรูปที่ 6.12 รูปที่ 6.13 และ 6.14 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหล ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่ามีค่าสูงมากช่วงรถไฟฟ้าออกตัวจากสถานี W1

6.6.2 ผลการทดสอบกรณีที่ 1

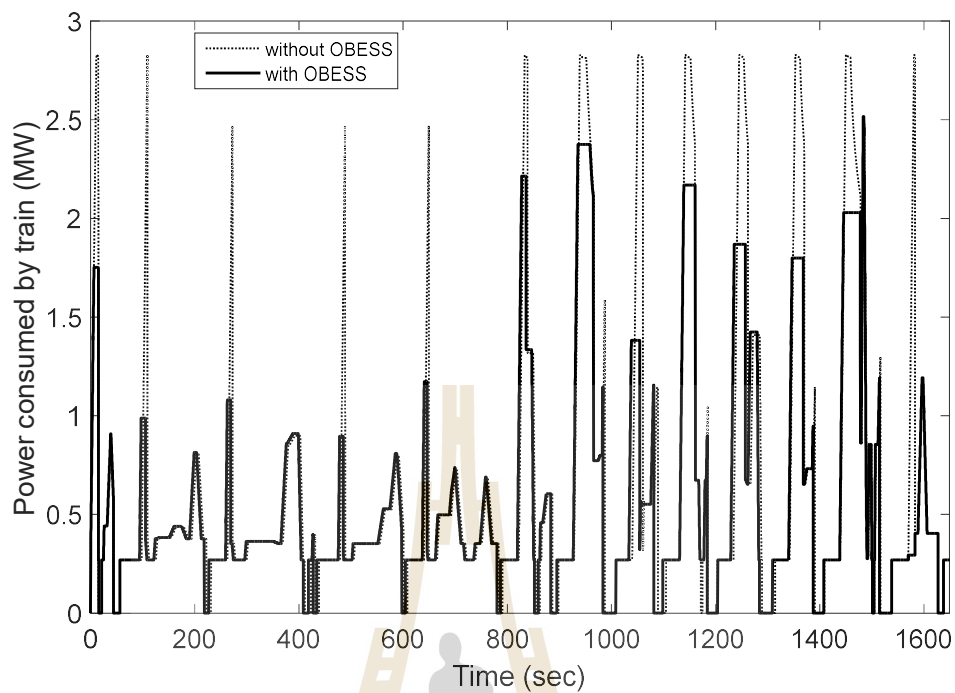
ผลการทดสอบของกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูปที่ 6.15 – 6.24



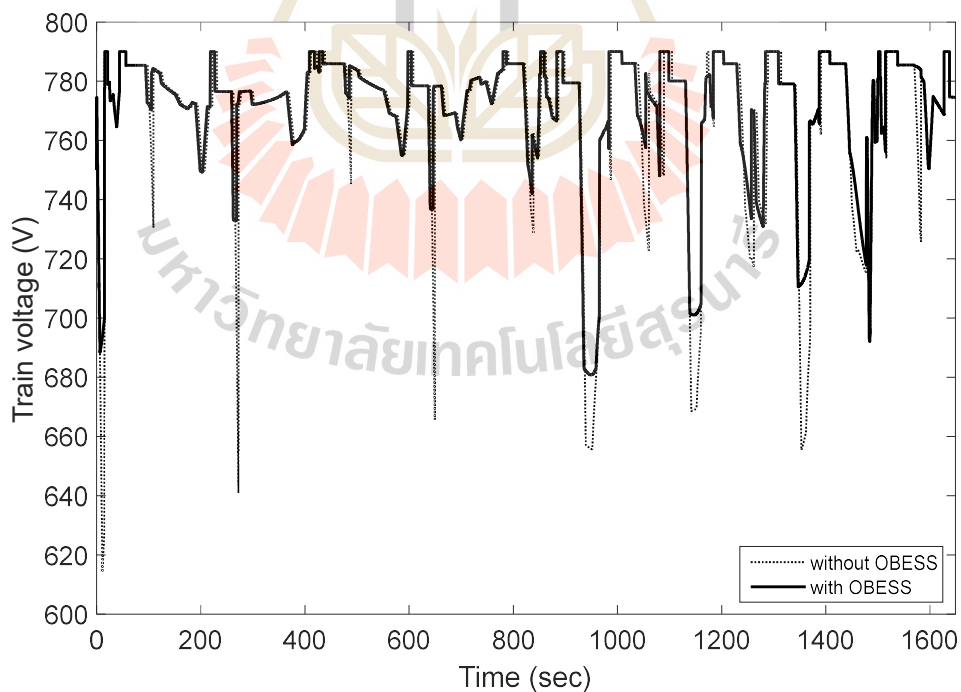
รูปที่ 6.15 โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 1



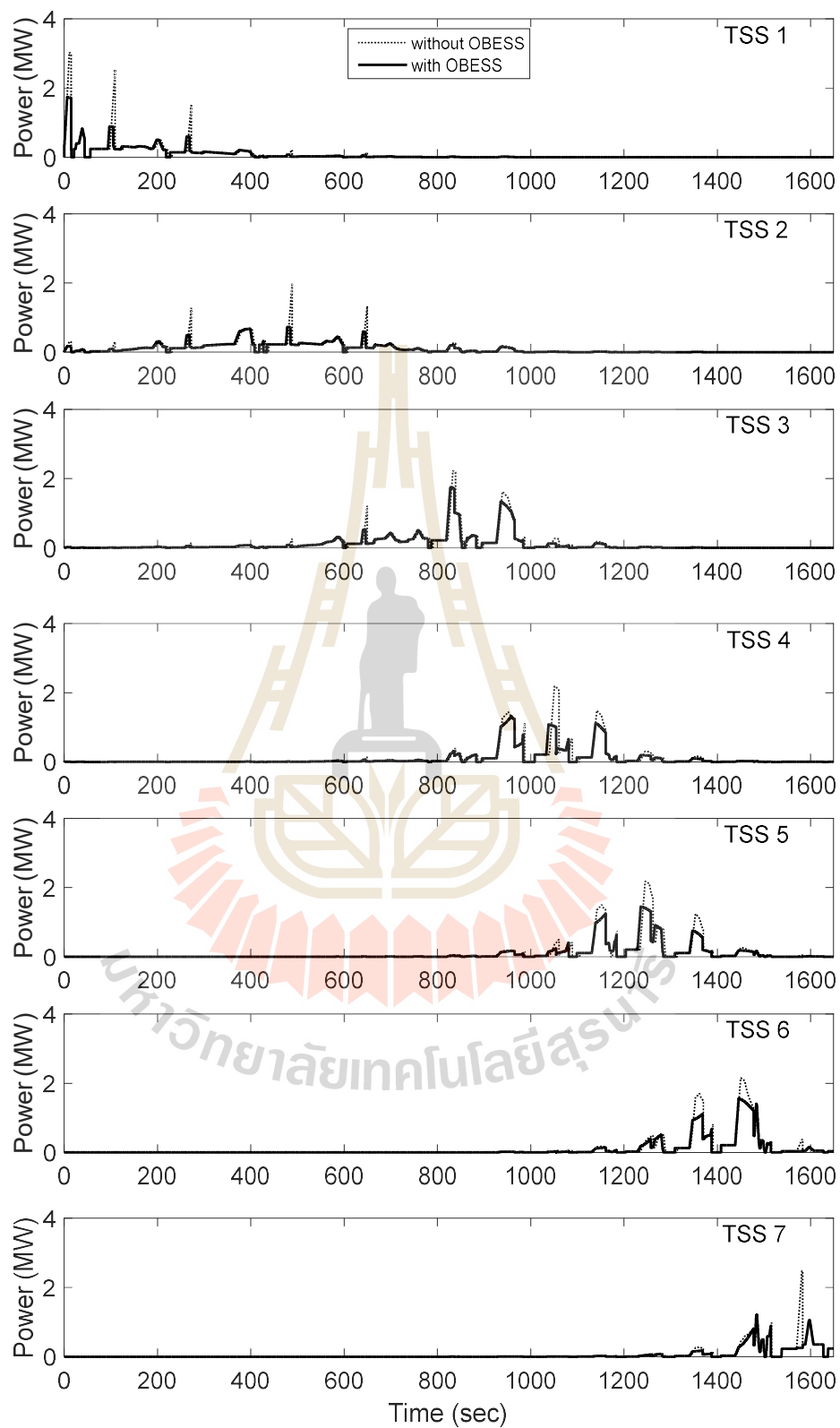
รูปที่ 6.16 กำลังไฟฟ้าของ OBESS และ %SOC ของการทดสอบกรณีที่ 1



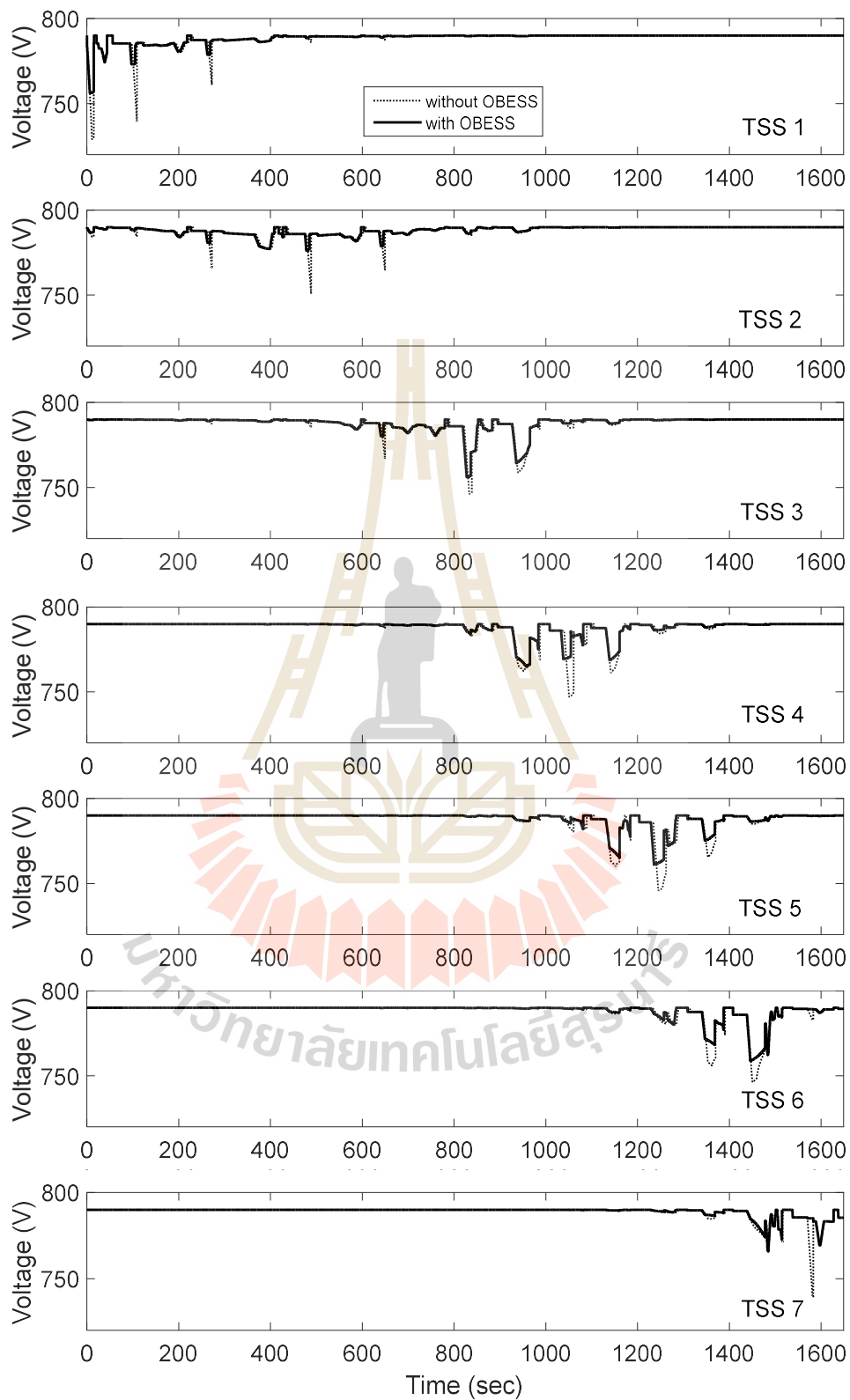
รูปที่ 6.17 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของการทดสอบกรณีที่ 1



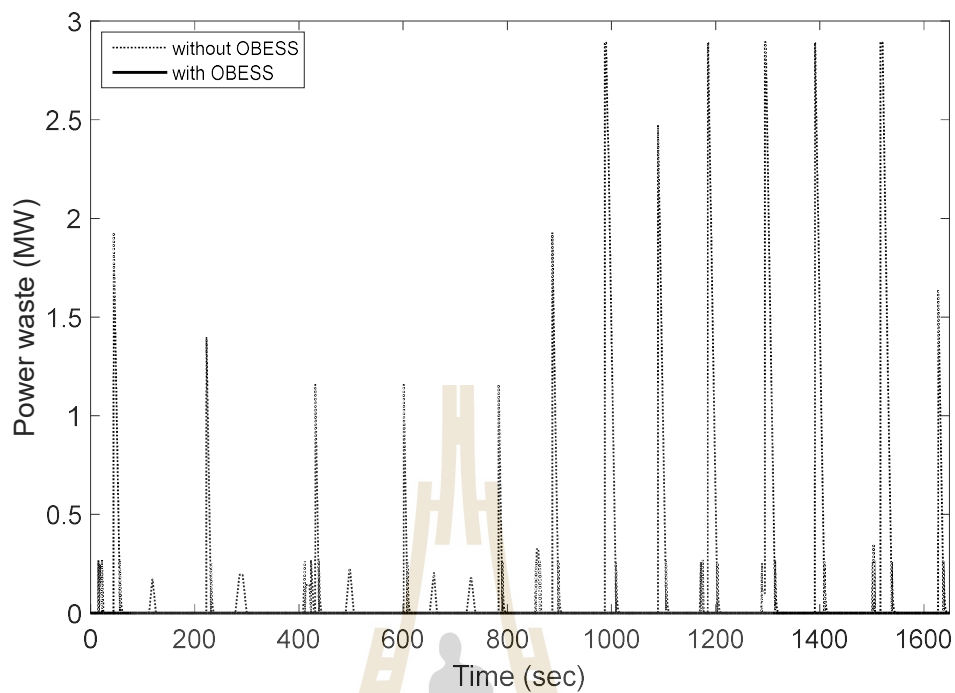
รูปที่ 6.18 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าของการทดสอบกรณีที่ 1



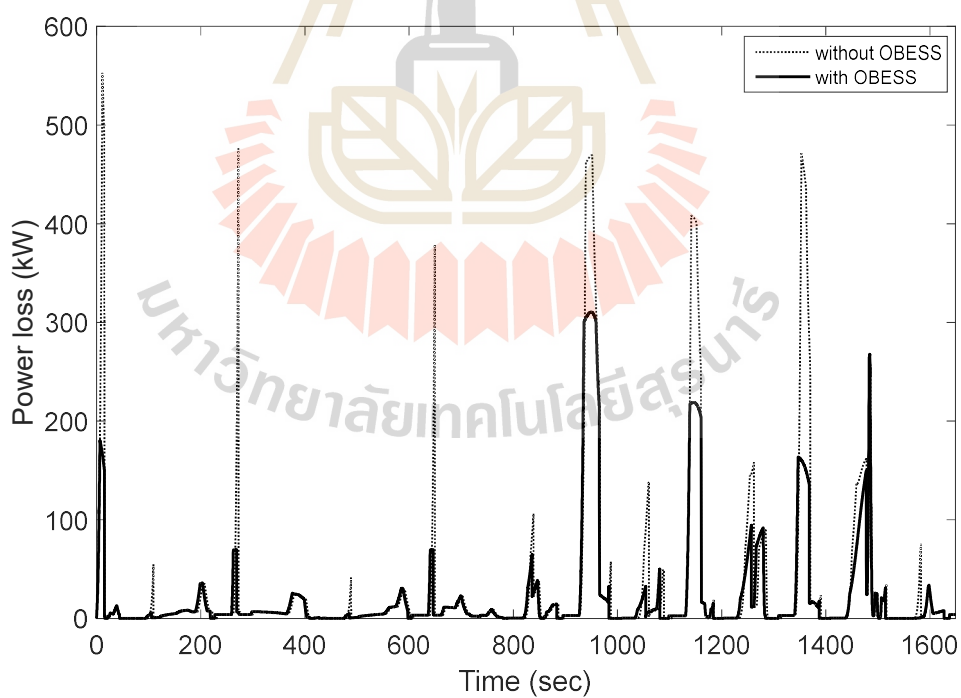
รูปที่ 6.19 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที 1



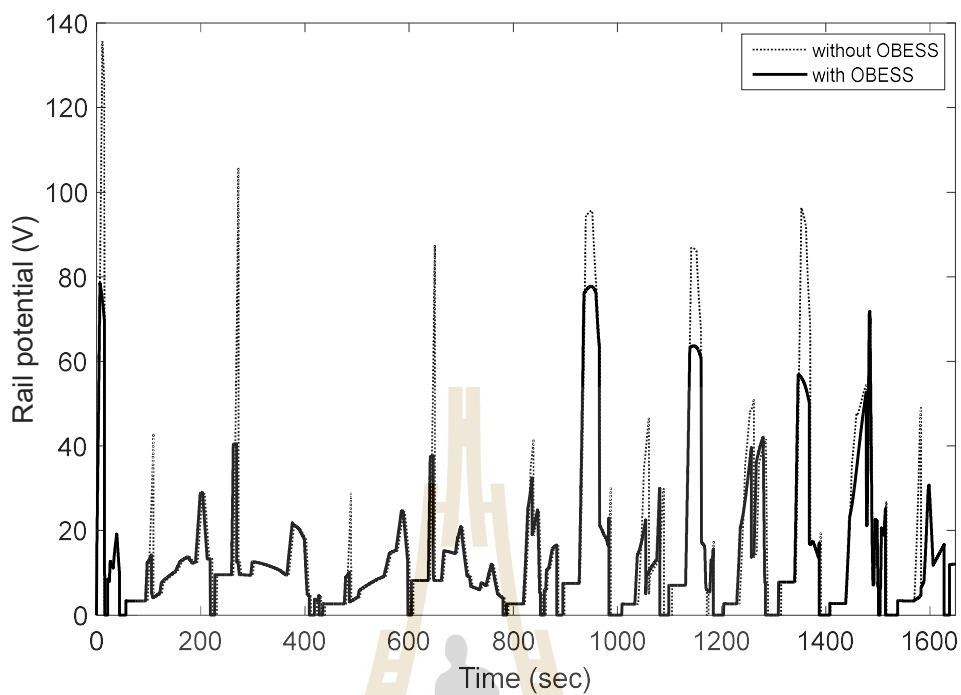
รูปที่ 6.20 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 1



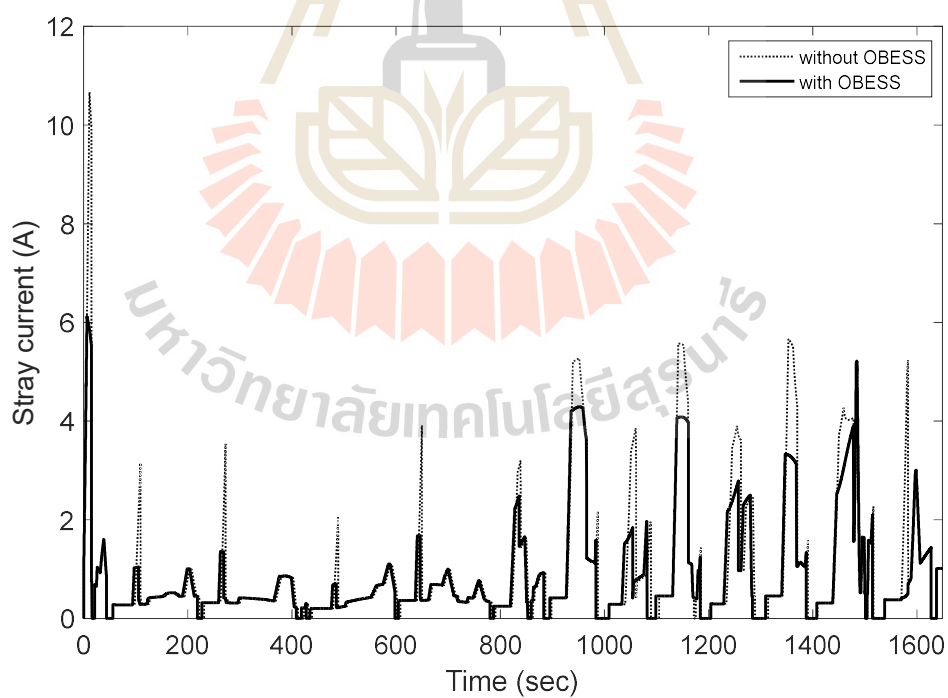
รูปที่ 6.21 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของการทดสอบกรณีที่ 1



รูปที่ 6.22 กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของการทดสอบกรณีที่ 1



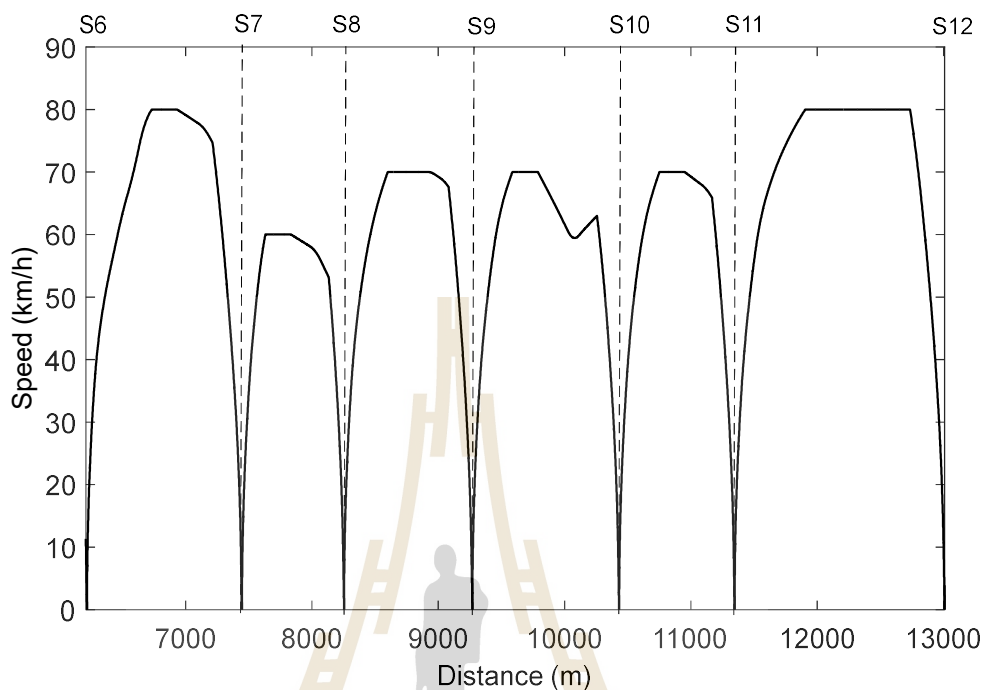
รูปที่ 6.23 แรงดันไฟฟ้าที่รางของการทดสอบกรณีที่ 1



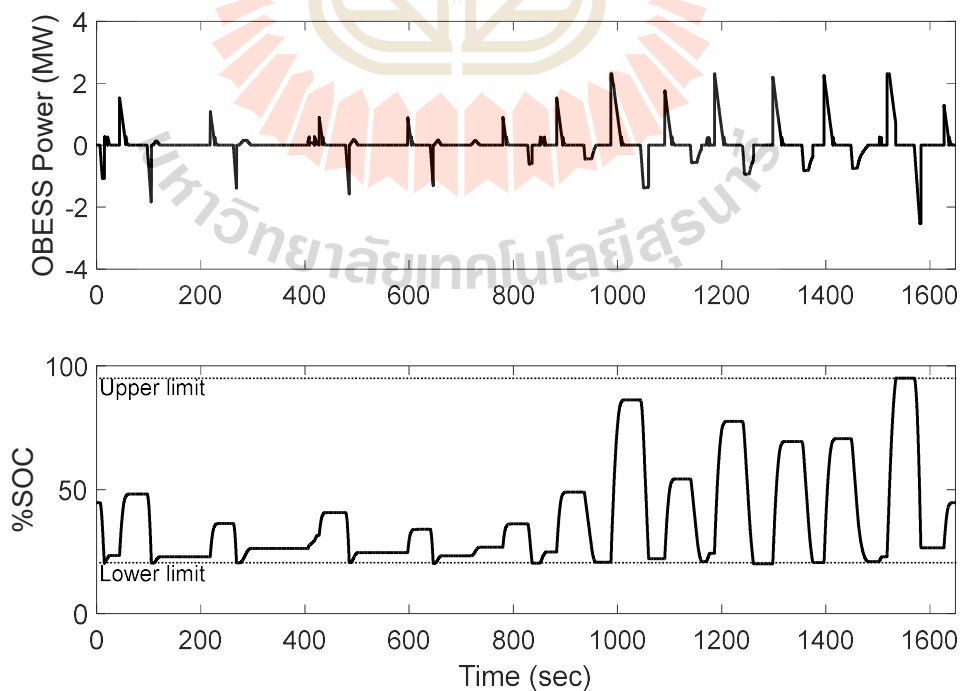
รูปที่ 6.24 กระแสไฟฟ้ารั่วไหลของการทดสอบกรณีที่ 1

6.6.3 ผลการทดสอบกรณีที่ 2

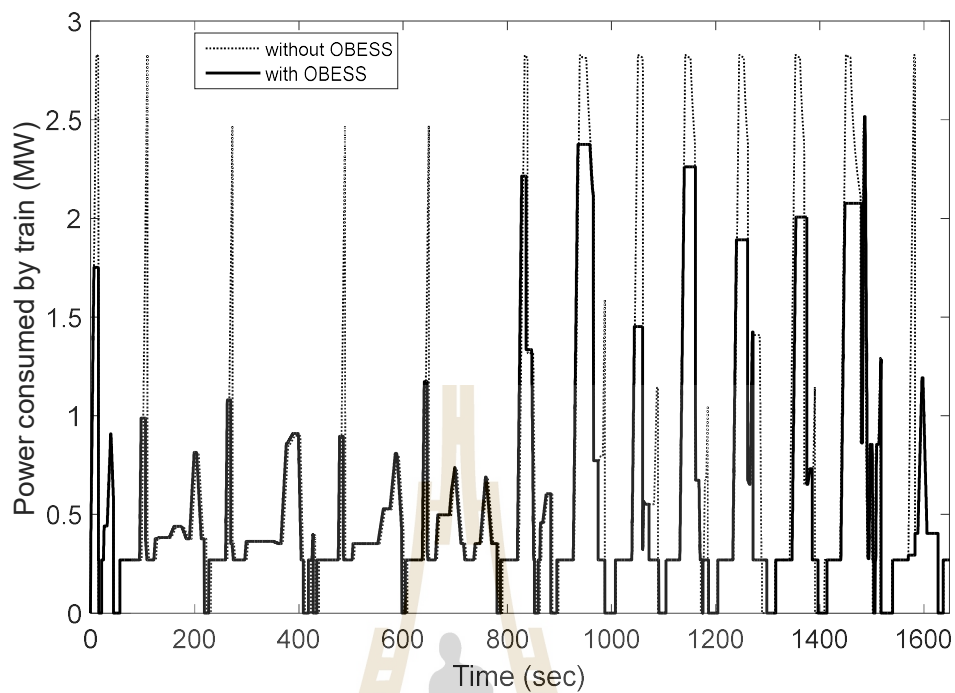
ผลการทดสอบของกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูปที่ 6.25 – 6.34



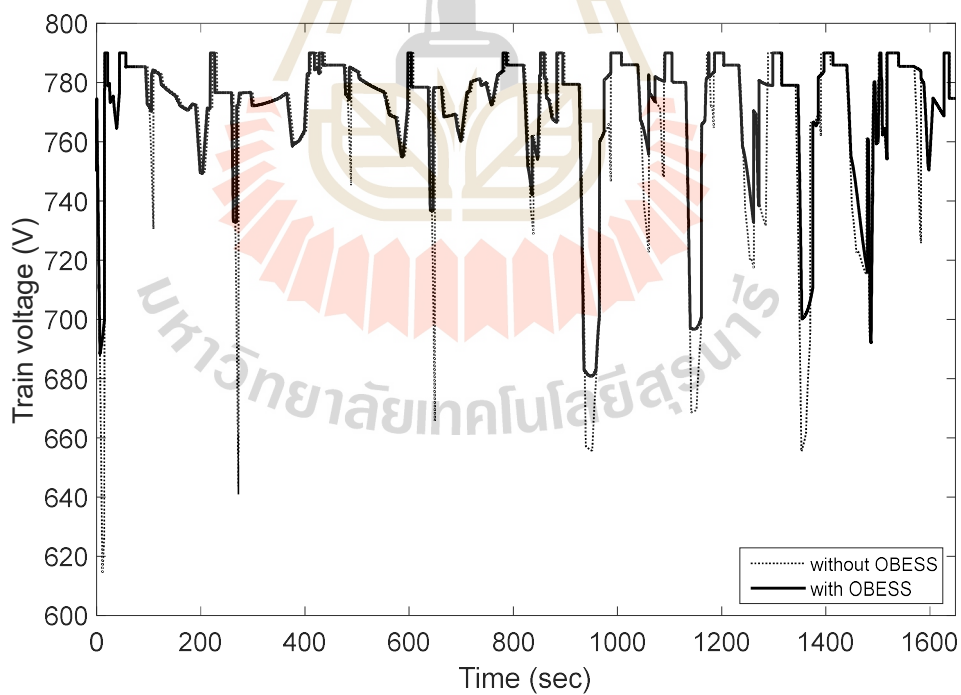
รูปที่ 6.25 โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 2



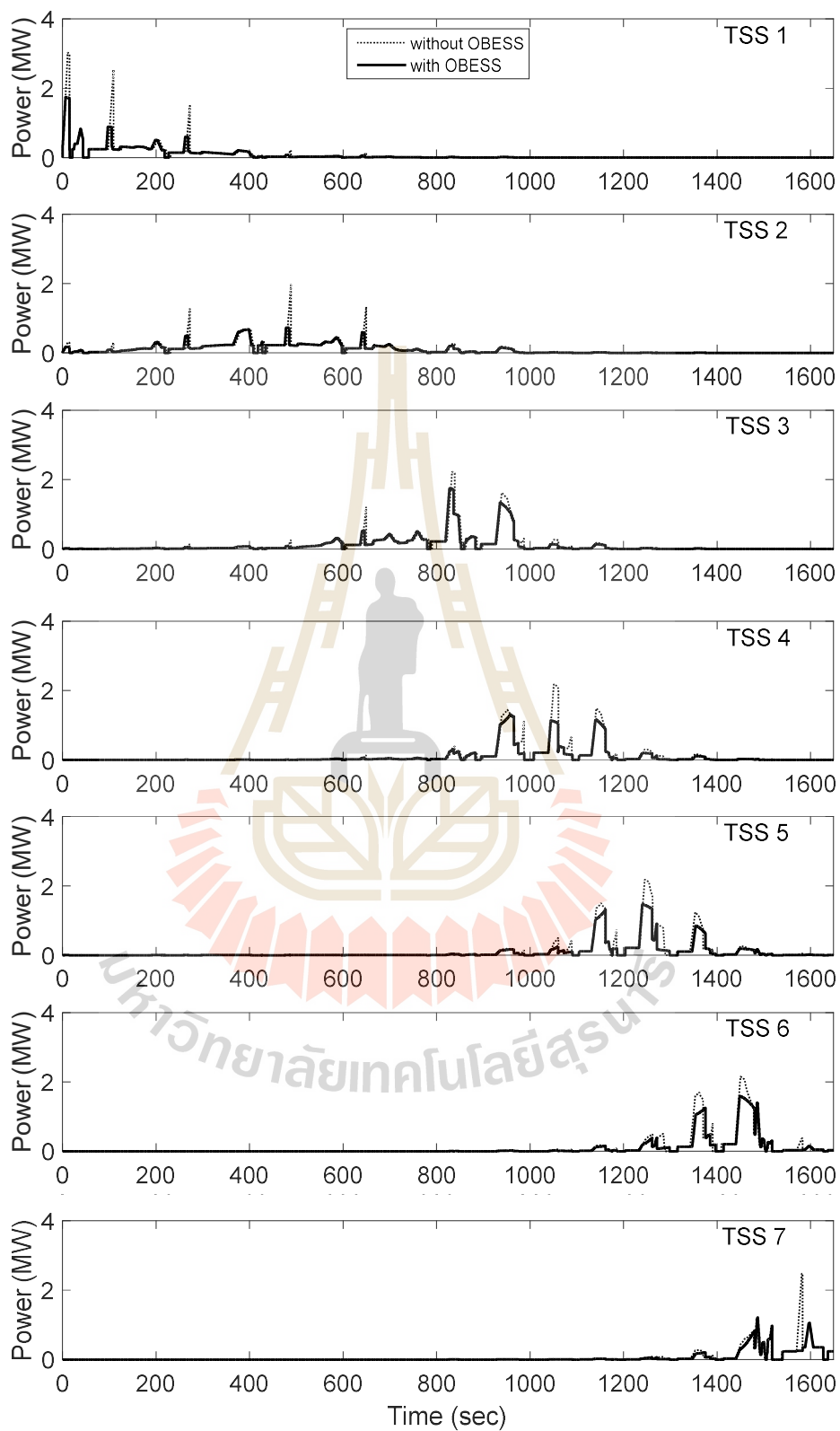
รูปที่ 6.26 กำลังไฟฟ้าของ OBESS และ %SOC ของการทดสอบกรณีที่ 2



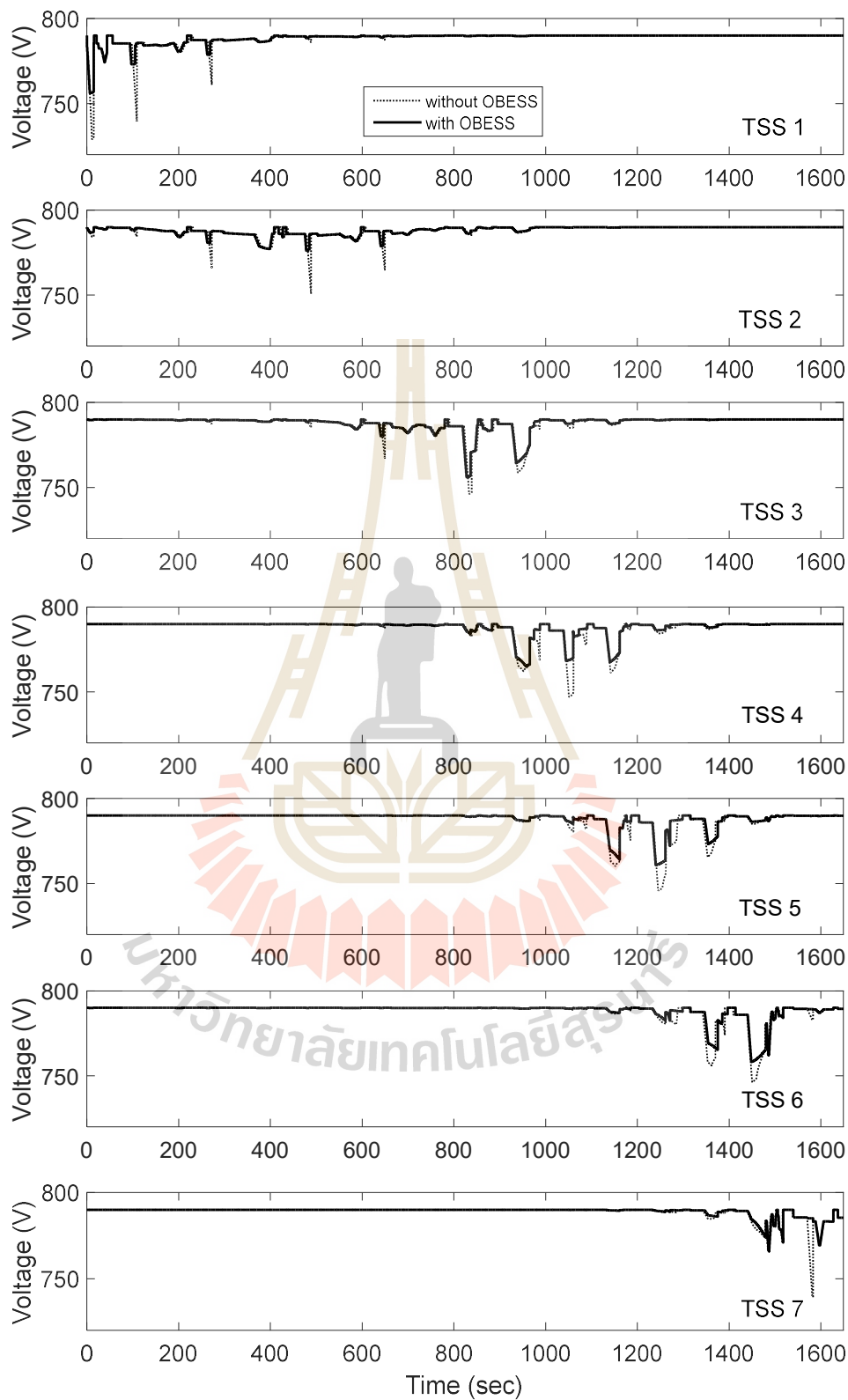
รูปที่ 6.27 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของการทดสอบกรณีที่ 2



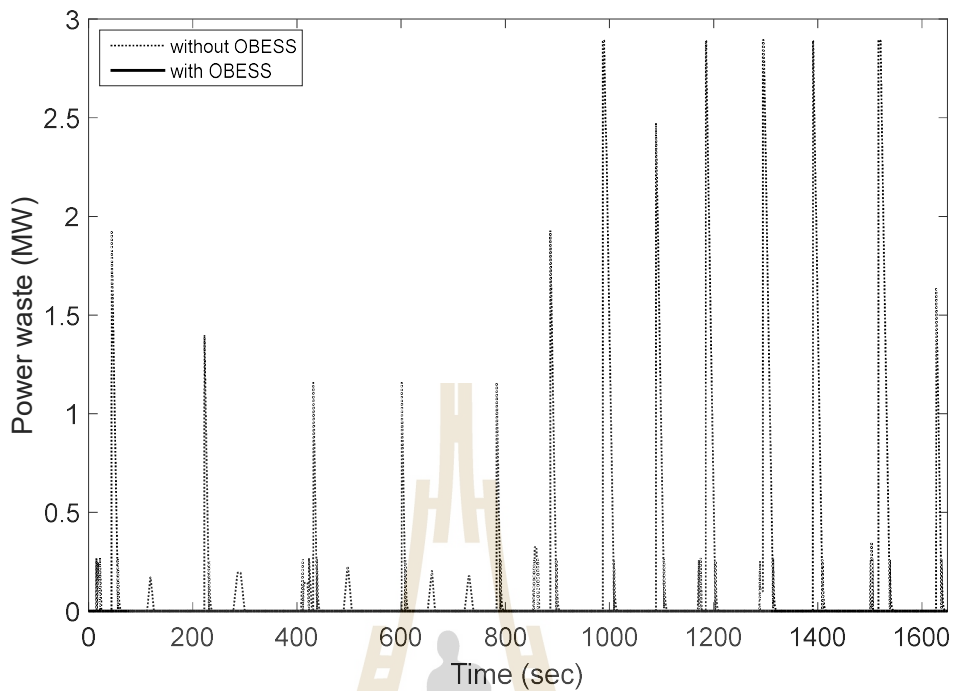
รูปที่ 6.28 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าของการทดสอบกรณีที่ 2



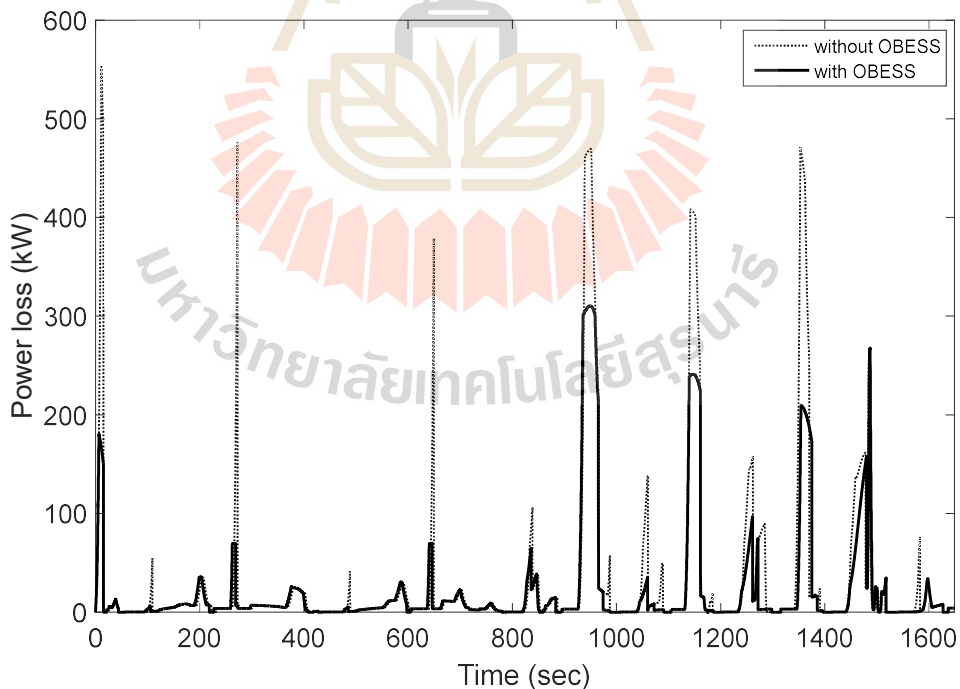
รูปที่ 6.29 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 2



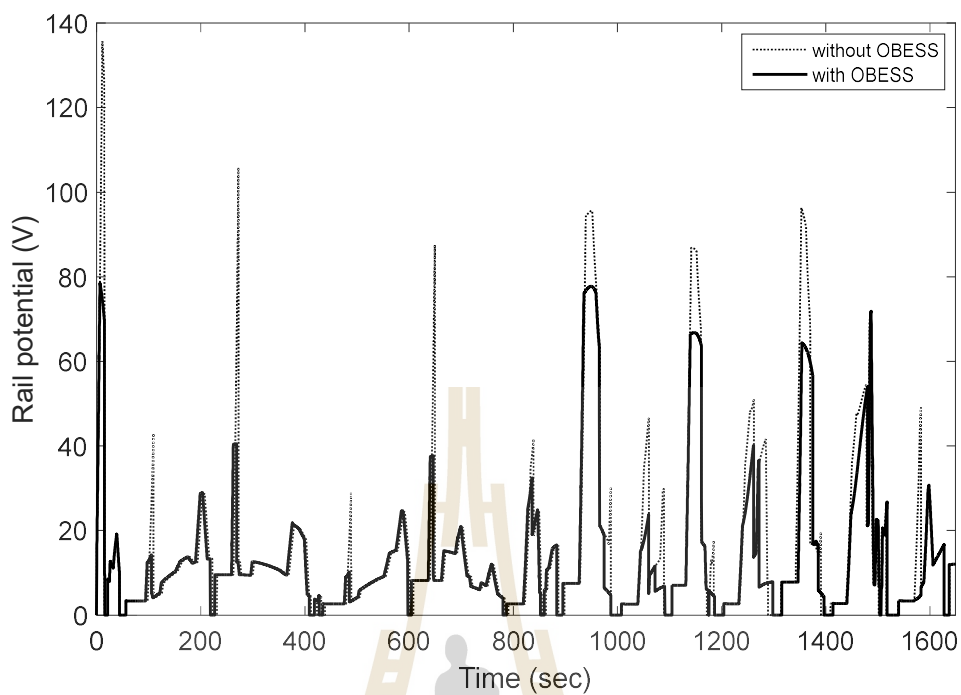
รูปที่ 6.30 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 2



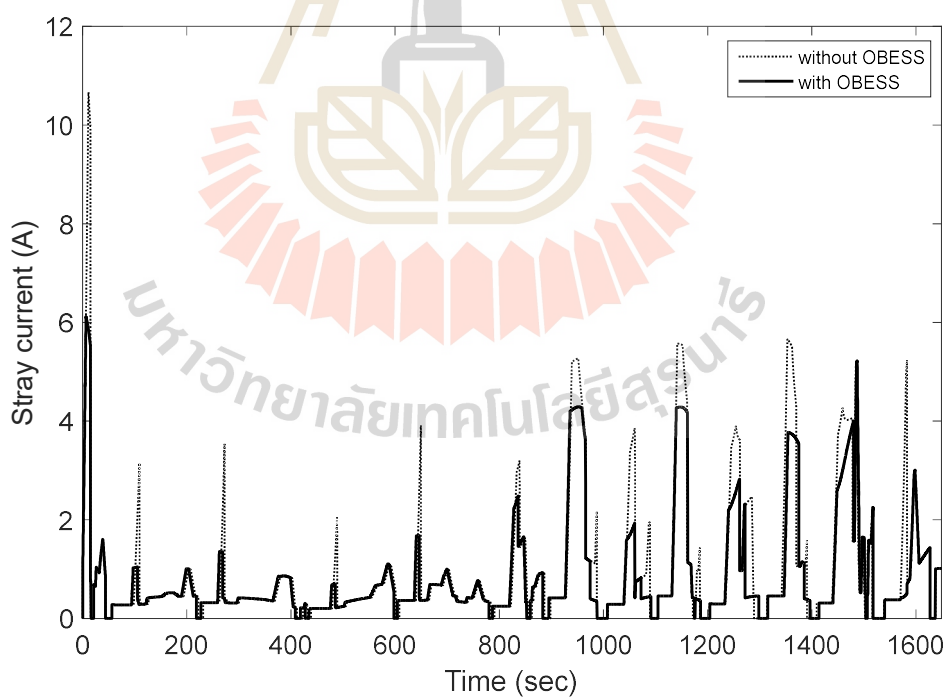
รูปที่ 6.31 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของการทดสอบกรณีที่ 2



รูปที่ 6.32 กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของการทดสอบกรณีที่ 2



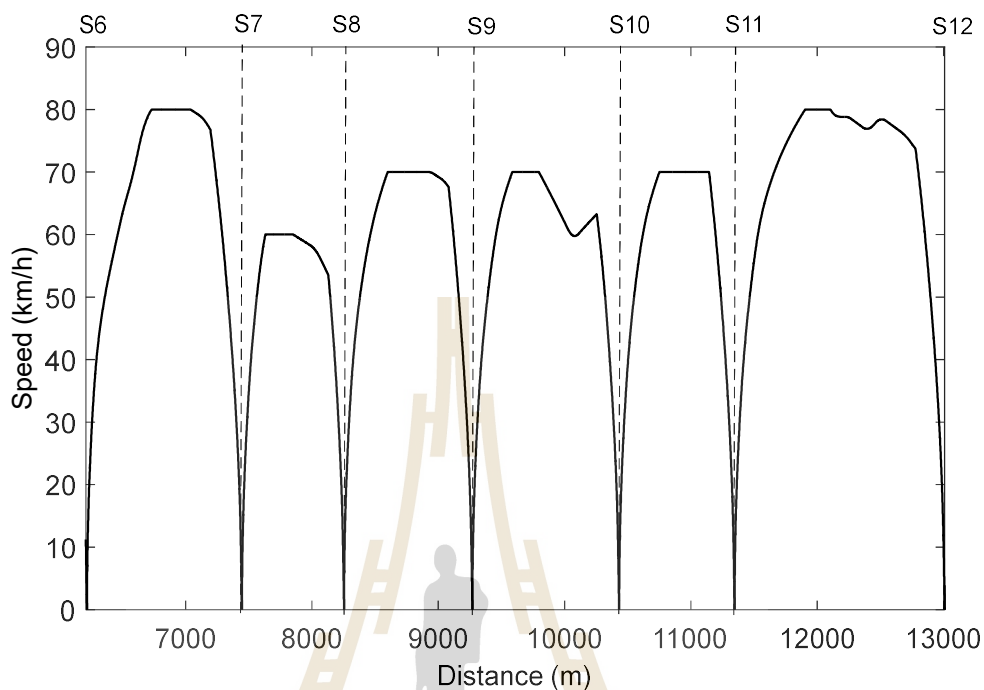
รูปที่ 6.33 แรงดันไฟฟ้าที่รางของการทดสอบกรณีที่ 2



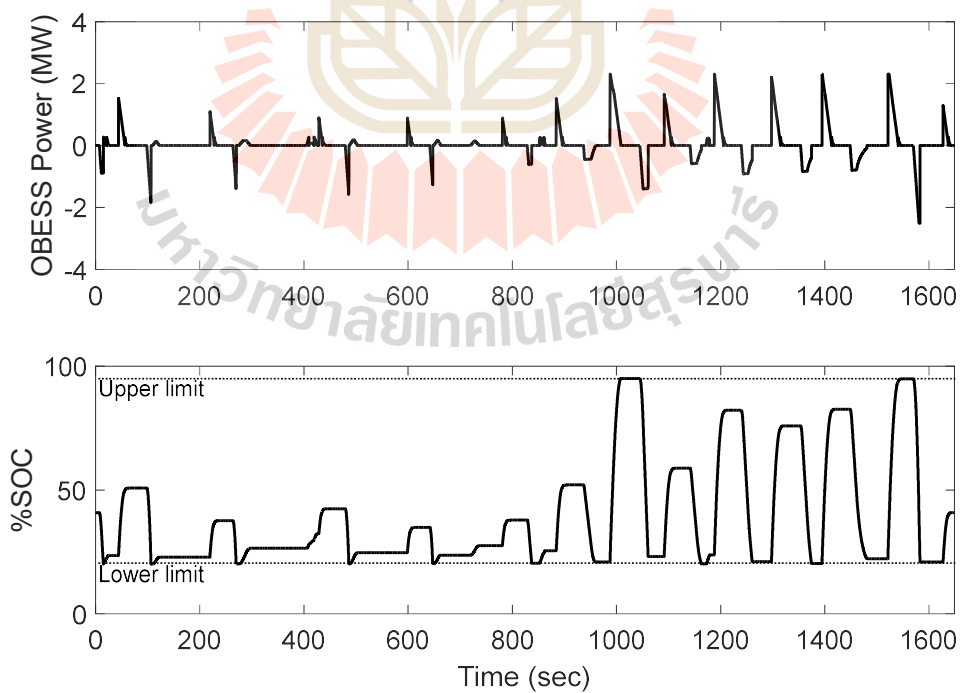
รูปที่ 6.34 กระแสไฟฟ้ารั่วไหลของการทดสอบกรณีที่ 2

6.6.4 ผลการทดสอบกรณีที่ 3

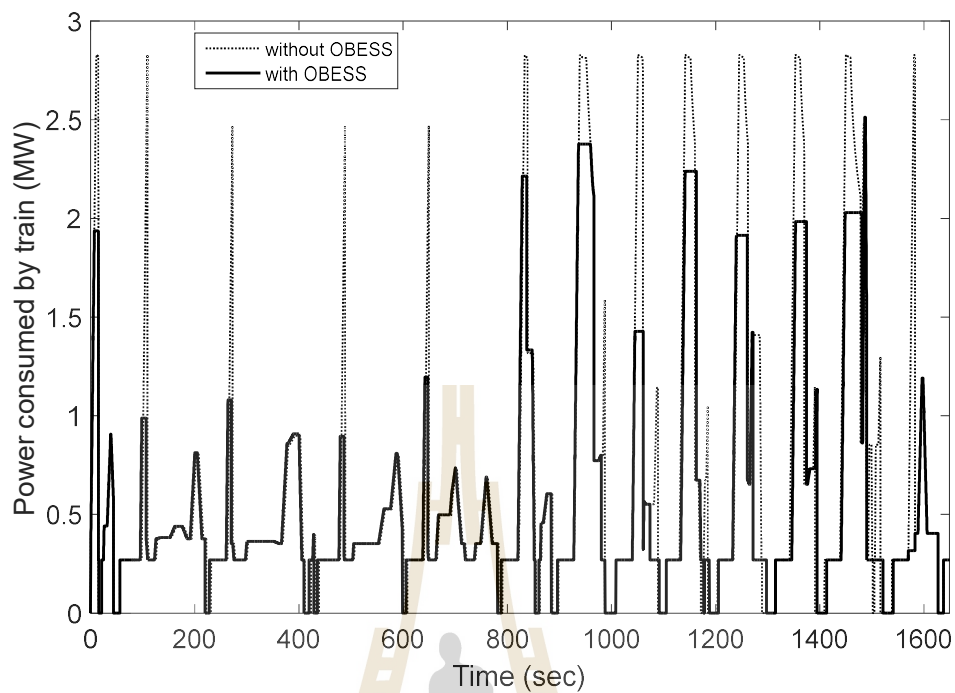
ผลการทดสอบของกรณีที่ 3 เปรียบเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูปที่ 6.35 – 6.44



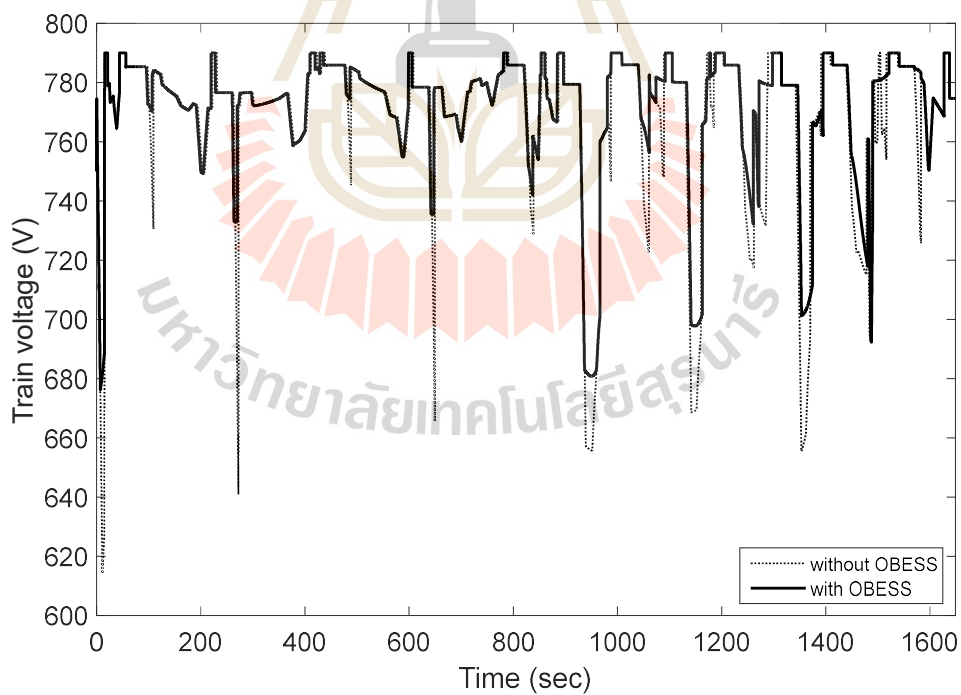
รูปที่ 6.35 โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 3



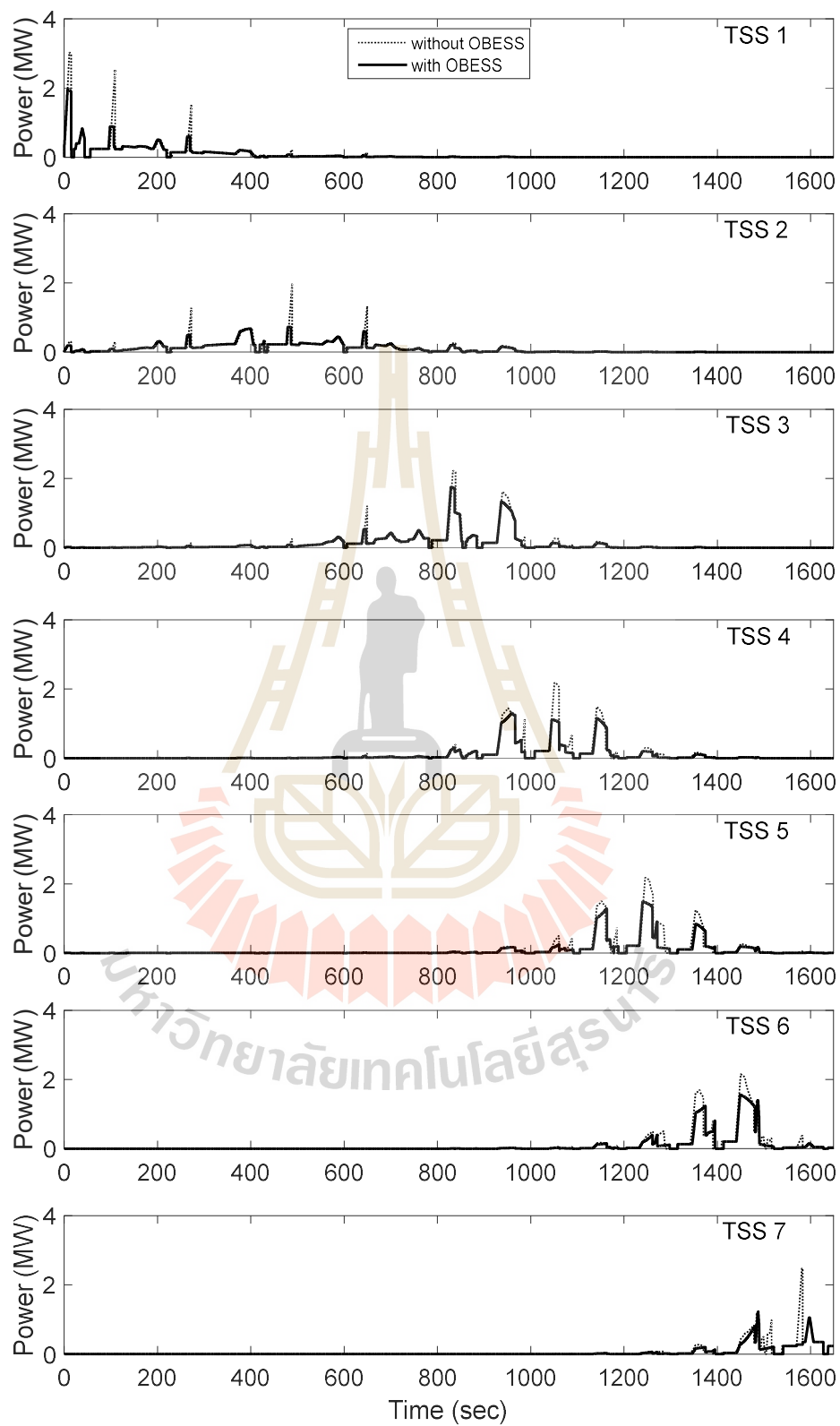
รูปที่ 6.36 กำลังไฟฟ้าของ OBESS และ %SOC ของการทดสอบกรณีที่ 3



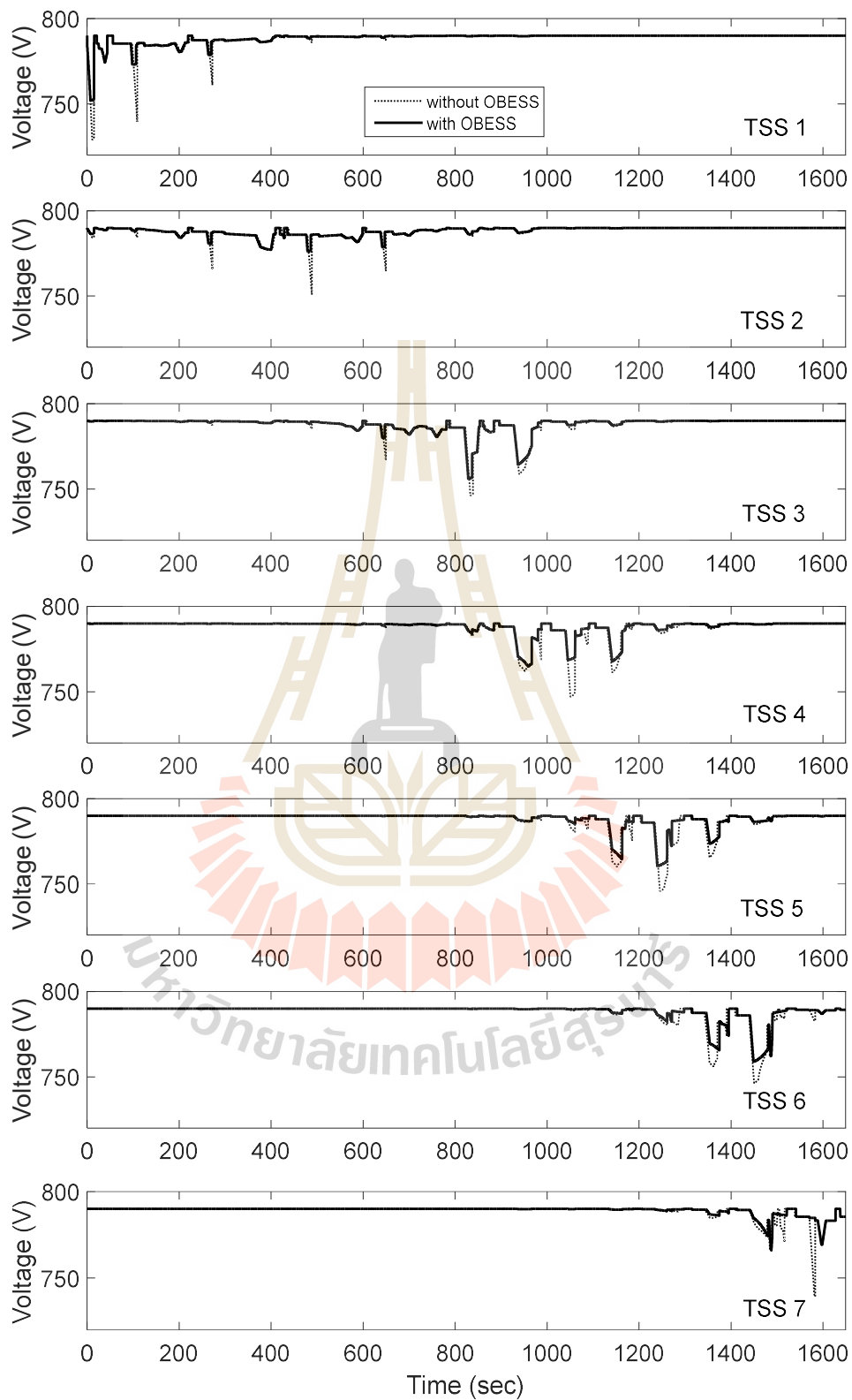
รูปที่ 6.37 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของการทดสอบกรณีที่ 3



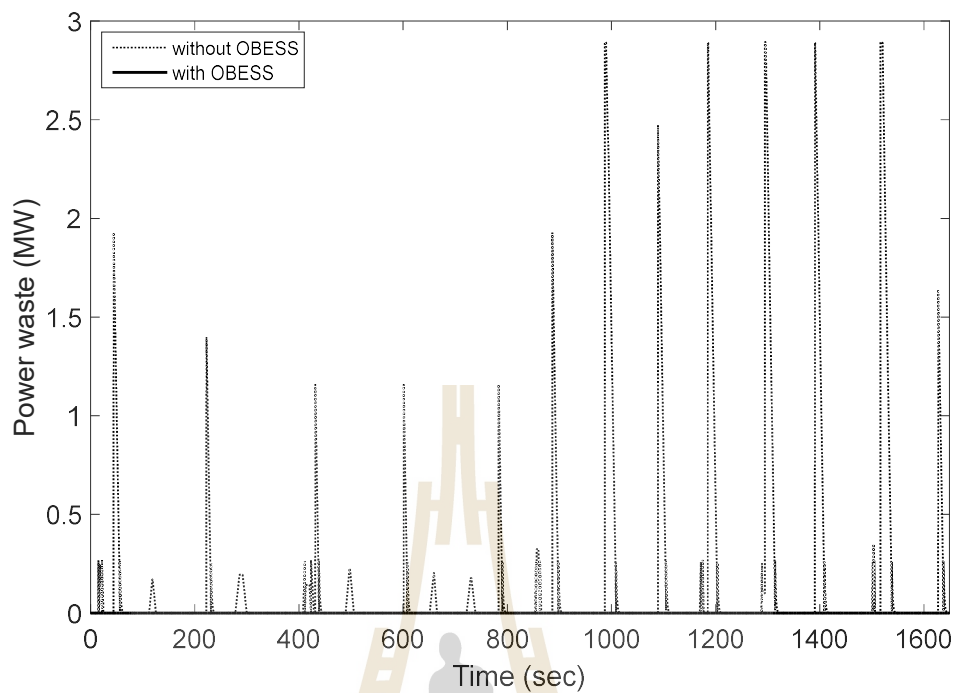
รูปที่ 6.38 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟไฟฟ้าของการทดสอบกรณีที่ 3



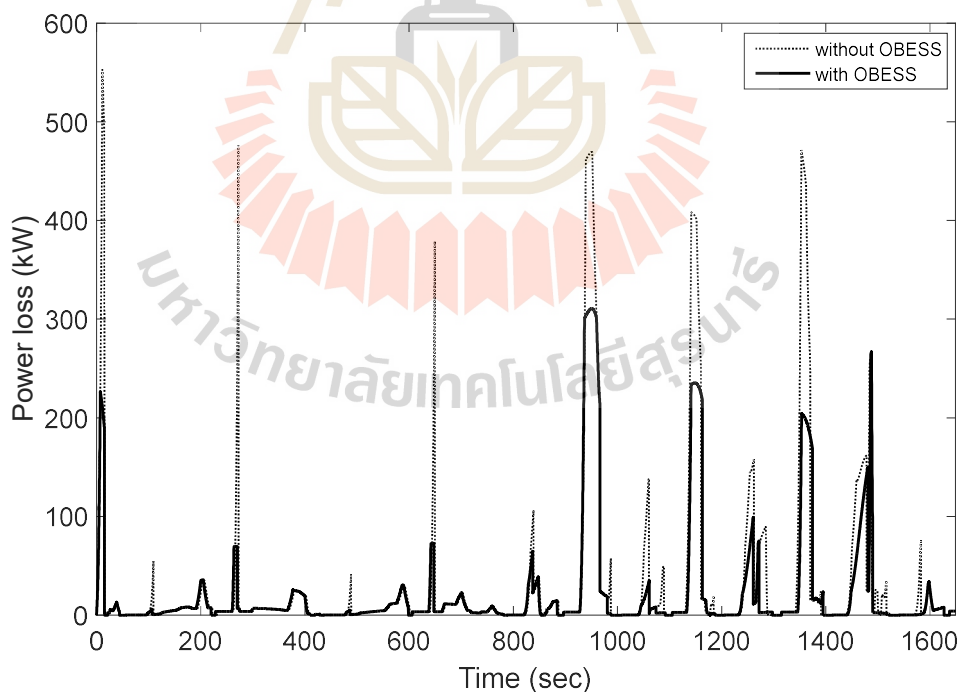
รูปที่ 6.39 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 3



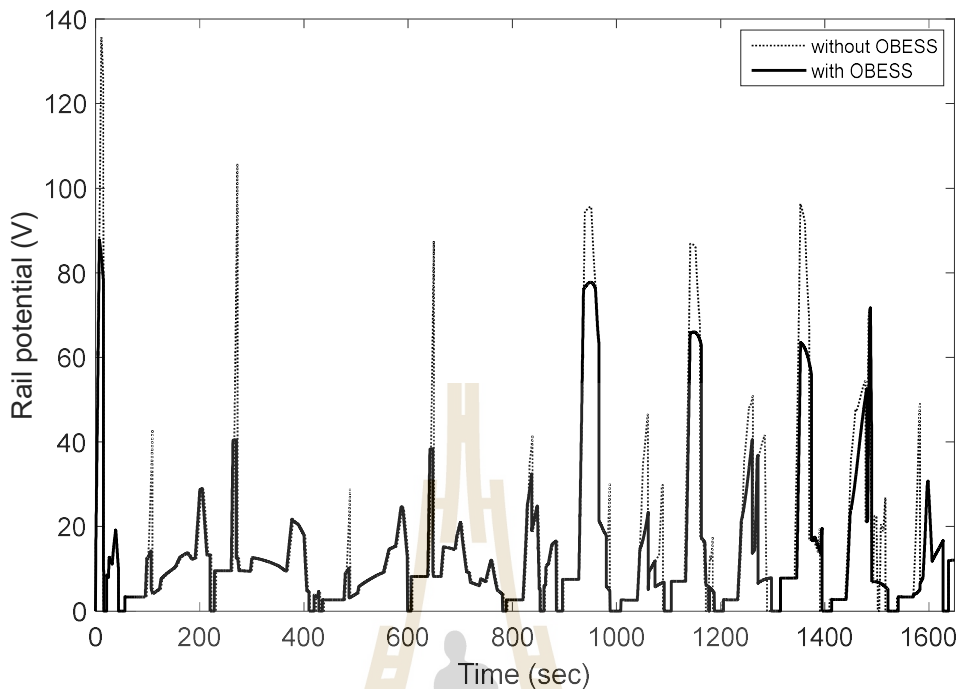
รูปที่ 6.40 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบกรณีที่ 3



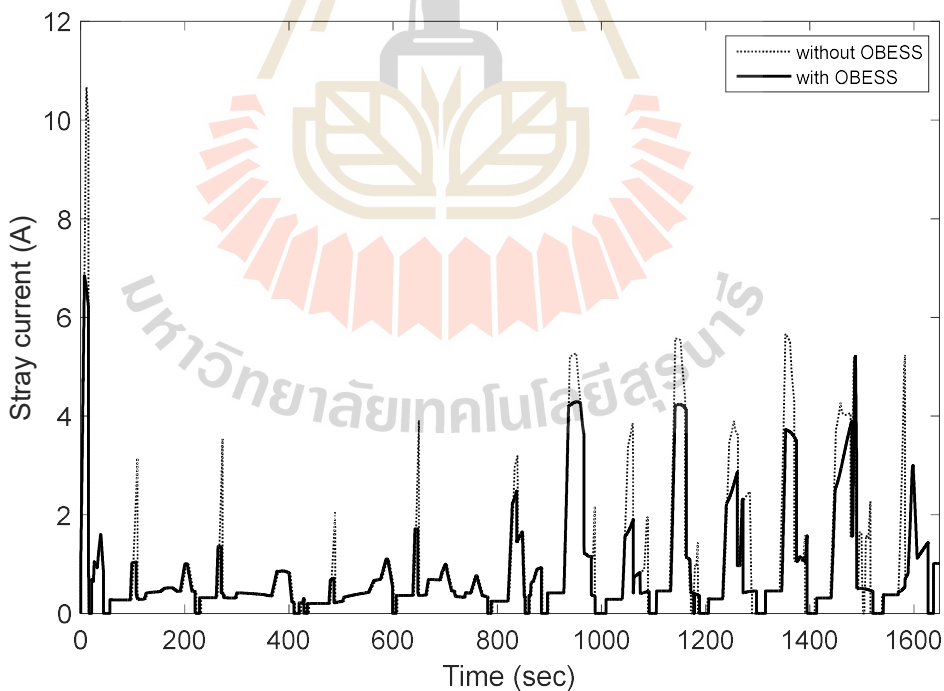
รูปที่ 6.41 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของการทดสอบกรณีที่ 3



รูปที่ 6.42 กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของการทดสอบกรณีที่ 3



รูปที่ 6.43 แรงดันไฟฟ้าที่รางของการทดสอบกรณีที่ 3



รูปที่ 6.44 กระแสไฟฟ้าวไหลของการทดสอบกรณีที่ 3

ผลการทดสอบของกรณีที่ 1 จะต้องติดตั้ง OBESS จำนวน 11 มอดูล และค่า %SOC เริ่มต้นเท่ากับ 44.8% แสดงดังรูปที่ 6.15-6.24 การทดสอบจะทำการปรับตัวควบคุม k_{dec} ในช่วง

สถานี S6 ถึง S12 เท่านั้น โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 1 แสดงดังรูปที่ 6.15 กำลังไฟฟ้าของ OBESS และค่า %SOC แสดงดังรูปที่ 6.16 จะเห็นว่าตลอดเส้นทางการเดินรถจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามโหมดการทำงานของ OBESS ว่าอยู่ในโหมดประจุไฟฟ้าหรือคายประจุไฟฟ้า โดย %SOC จะแทนสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ใน OBESS เทียบกับพลังงานไฟฟ้าของ OBESS จากพิกัดติดตั้ง กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่จะมีค่าลดลง โดยเฉพาะตอนรถไฟฟ้าเร่งออกจากสถานี ดังรูปที่ 6.17 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6.18 กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะลดลงและเพิ่มขึ้น ในช่วงที่รถไฟฟ้าวิ่งผ่านสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนนั้น ๆ ดังรูปที่ 6.19 และ 6.20 ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกจะลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีฐาน ดังรูปที่ 6.21 กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมจะลดลง แสดงดังรูปที่ 6.22 รูปที่ 6.23 และ 6.24 แสดงแรงดันรางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหล ซึ่งทั้งสองค่าให้ผลที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน

ผลการทดสอบของกรณีที่ 2 จะต้องติดตั้ง OBESS จำนวน 11 มอดูล และค่า %SOC เริ่มต้นเท่ากับ 44.8% เหมือนกับกรณีที่ 1 แต่จะทำการปรับตัวควบคุม L_{coast} ในช่วงสถานี S6 ถึง S12 เท่านั้น แสดงดังรูปที่ 6.25-6.34 โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 2 แสดงดังรูปที่ 6.25 จะเห็นว่าลักษณะโครงร่างแตกต่างจากกรณีที่ 1 เนื่องจากตัวควบคุม L_{coast} จะมีค่าทุกช่วงยกเว้นช่วง S11-S12 ทำให้กำลังไฟฟ้าของ OBESS และค่า %SOC แสดงดังรูปที่ 6.26 มีค่าแตกต่างกับกรณีที่ 1 โดยเฉพาะในช่วง S6-S11 ที่มีโหมดการแล่น ซึ่งเกิดจากพลังงานคืนกลับจากการเบรกไม่เท่ากัน กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมจะลดลง แรงดันรางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหล จะให้ผลการทดลองคล้ายกับกรณีที่ 1 โดยจะต่างกันเฉพาะช่วงสถานี S6-S12 เท่านั้น แสดงดังรูปที่ 6.27-6.34

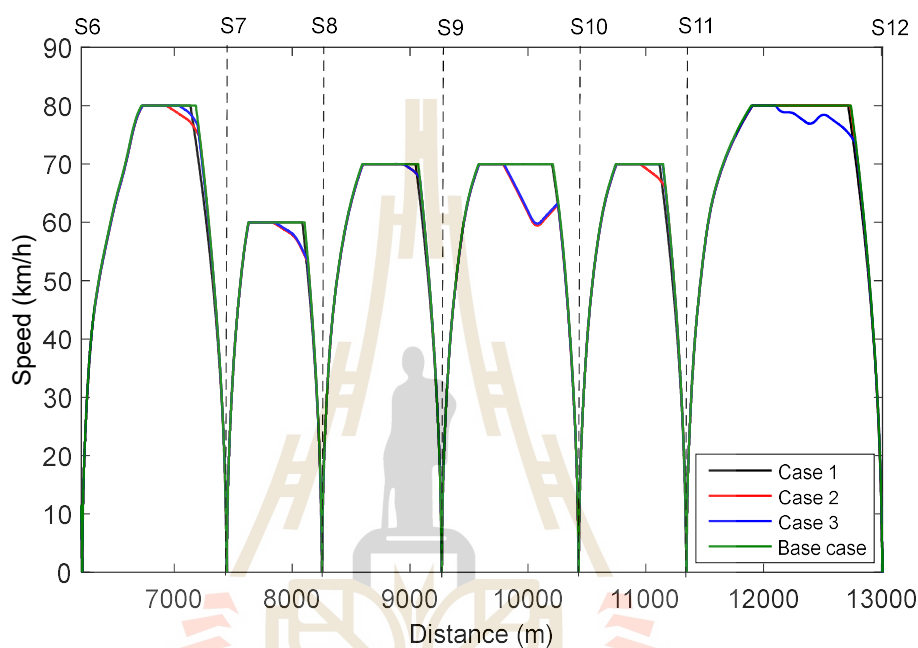
ผลการทดสอบของกรณีที่ 3 จะต้องติดตั้ง OBESS จำนวน 10 มอดูล และค่า %SOC เริ่มต้นเท่ากับ 40.9% ซึ่งแตกต่างจากทุกกรณี โดยจะทำการปรับตัวควบคุม k_{dec} และ L_{coast} ในช่วงสถานี S6 ถึง S12 เท่านั้น แสดงดังรูปที่ 6.35-6.44 โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบกรณีที่ 3 แสดงดังรูปที่ 6.35 จะเห็นว่าตัวควบคุม L_{coast} จะมีค่าทุกช่วงยกเว้นช่วง S10-S11 ทำให้ลักษณะโครงร่างแตกต่างจากกรณีที่ 1 กำลังไฟฟ้าของ OBESS และค่า %SOC กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมจะลดลง แรงดันรางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหล จะให้ผลการทดลองคล้ายกับทั้งทุกกรณีก่อนหน้า โดยจะต่างกันเฉพาะช่วงสถานี S6-S12 เท่านั้น แสดงดังรูปที่ 6.37-6.44 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 นั้นจะต้อง

ติดตั้ง OBESS จำนวนน้อยที่สุด ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง OBESS น้อยกว่ากรณีอื่น อีกทั้งยังให้ผลการประหยัดพลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นอีกด้วย

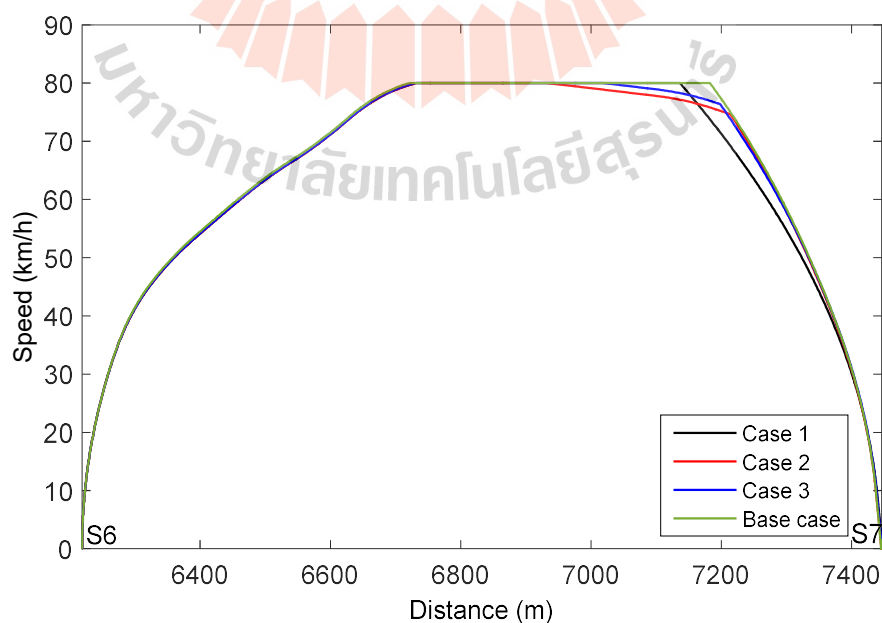
6.6.5 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

ผลการเปรียบเทียบการทดสอบทั้ง 3 กรณีที่นำเสนอเทียบกับกรณีฐาน แสดงดังรูป

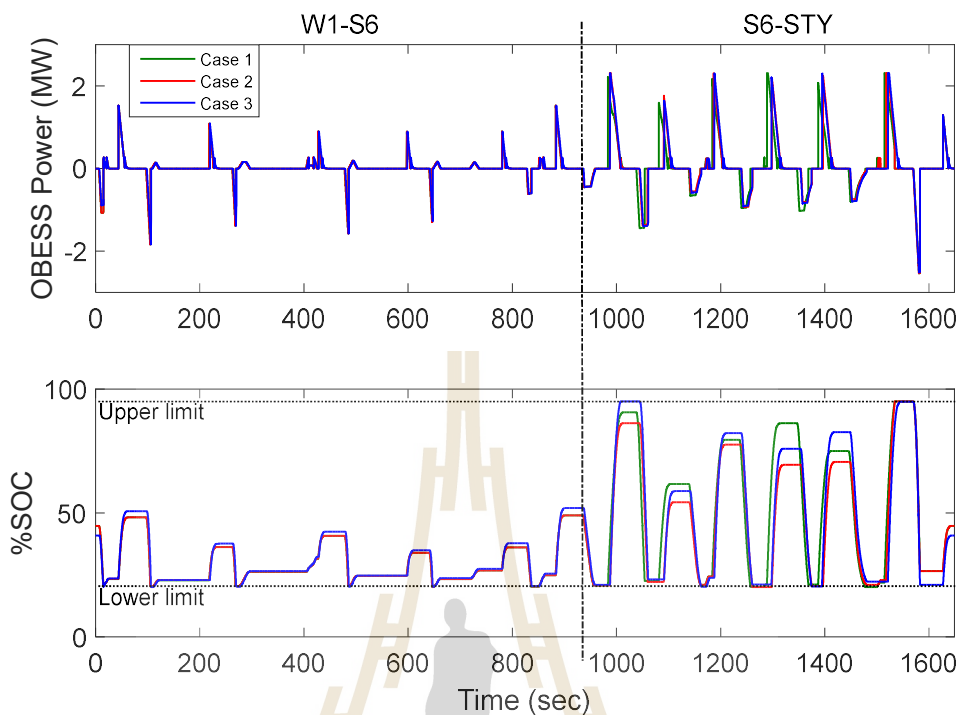
ที่ 6.45 – 6.55



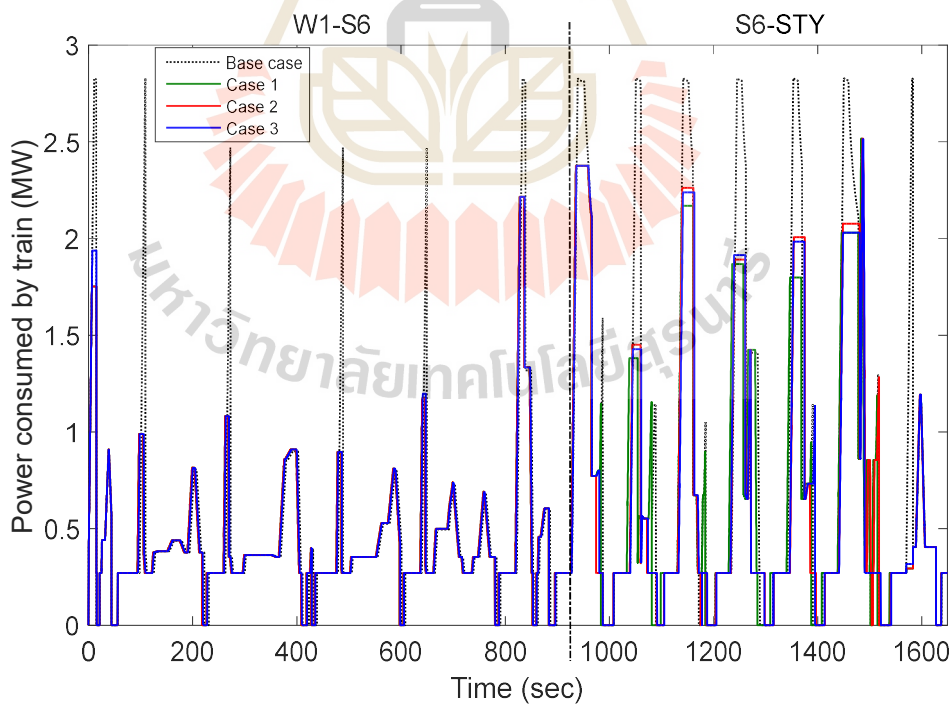
รูปที่ 6.45 โครงร่างความเร็วของรถไฟจากสถานี S6-S12 ของการทดสอบแต่ละกรณี



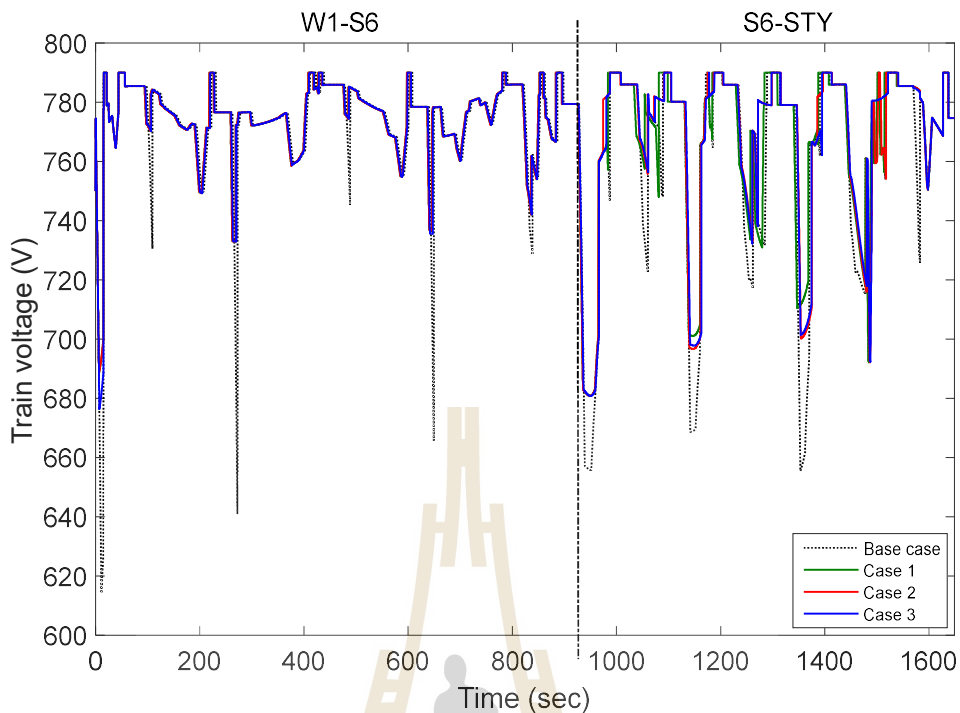
รูปที่ 6.46 ตัวอย่างโครงร่างความเร็วของรถไฟระหว่างสถานี S6-S7 ของการทดสอบแต่ละกรณี



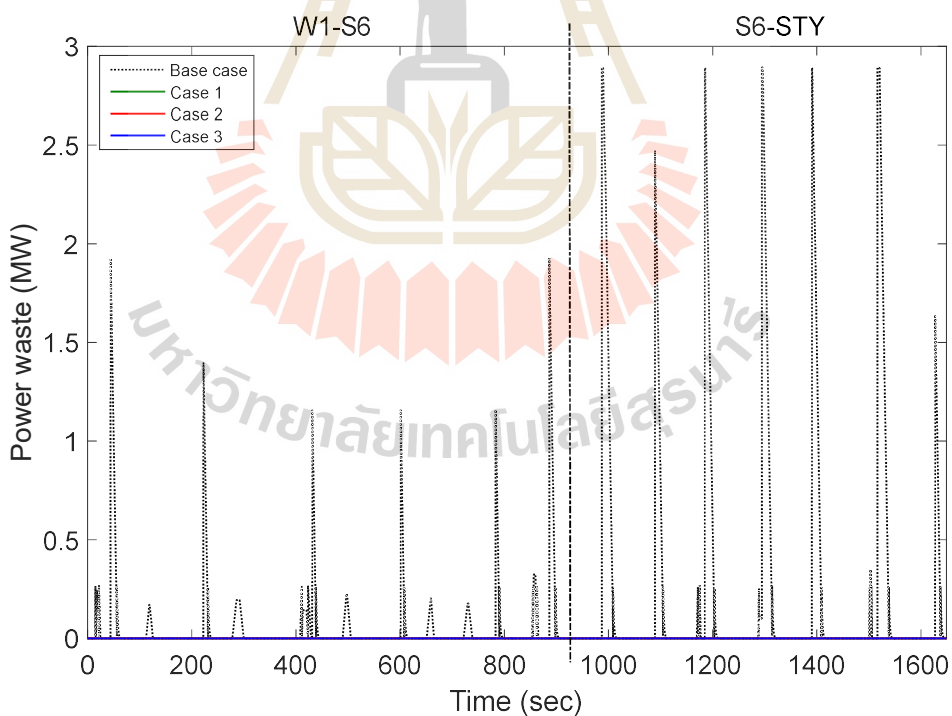
รูปที่ 6.47 กำลังไฟฟ้าของ OBESS และ %SOC ของการทดสอบแต่ละกรณี



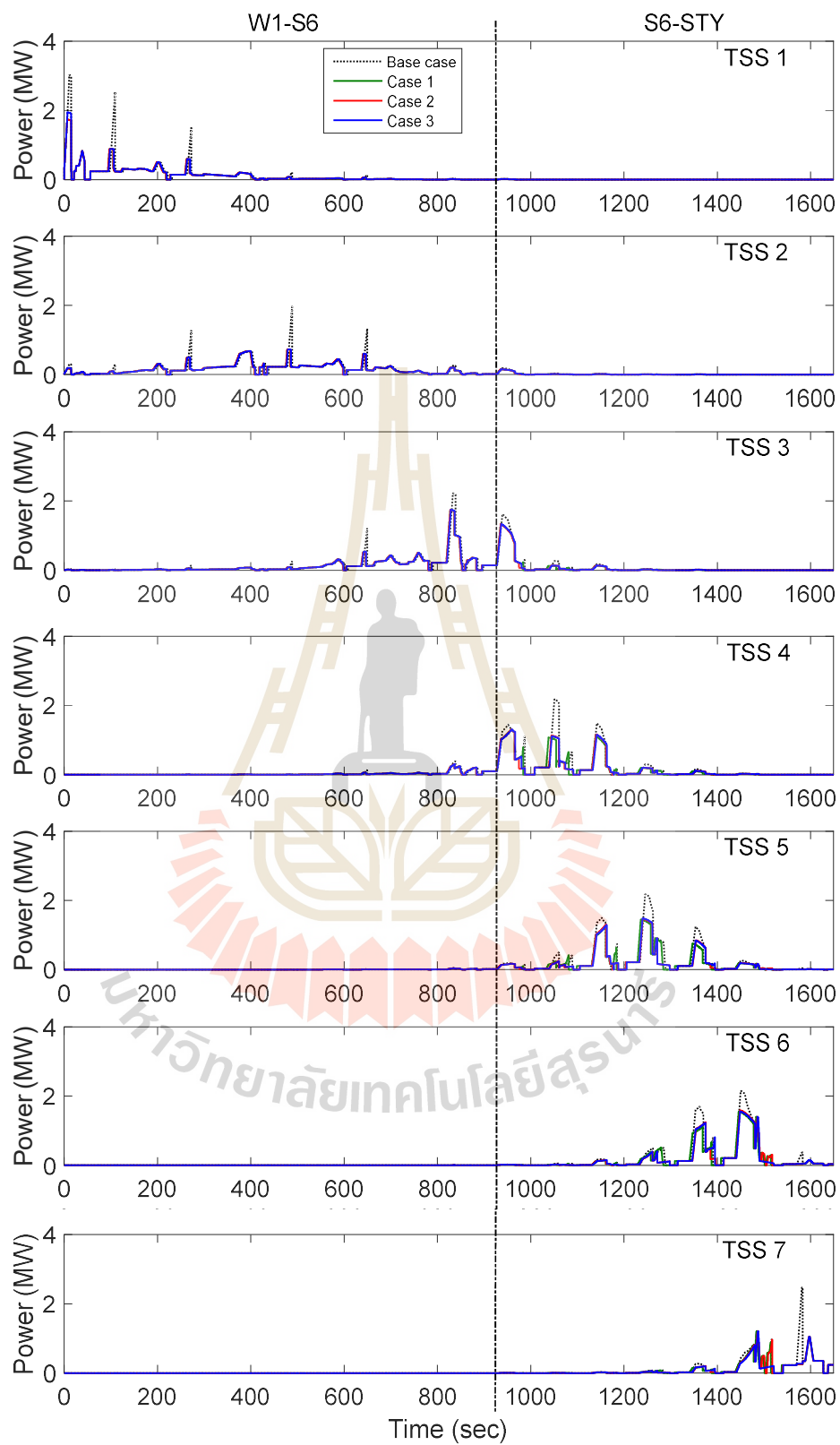
รูปที่ 6.48 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ของการทดสอบแต่ละกรณี



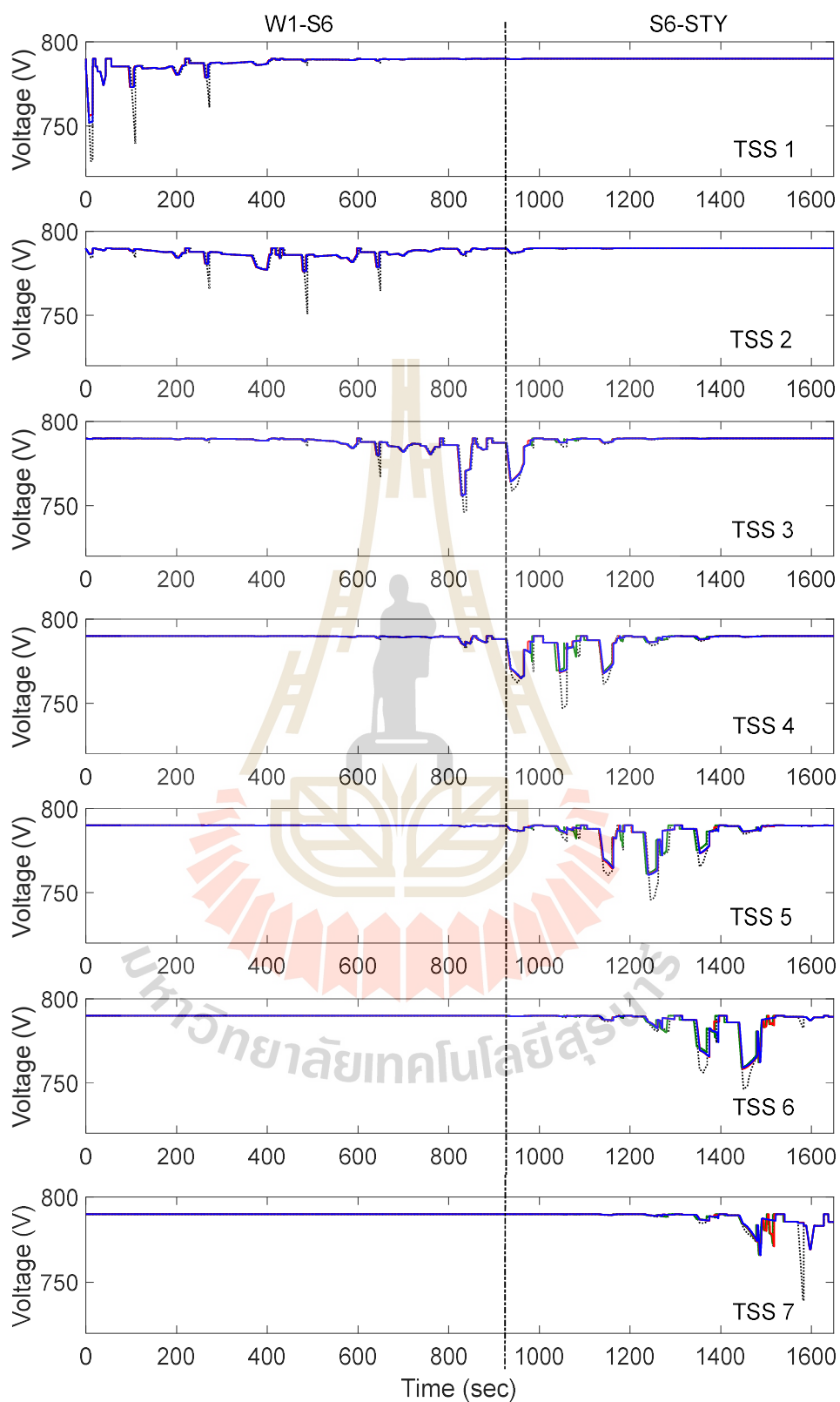
รูปที่ 6.49 แรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณี



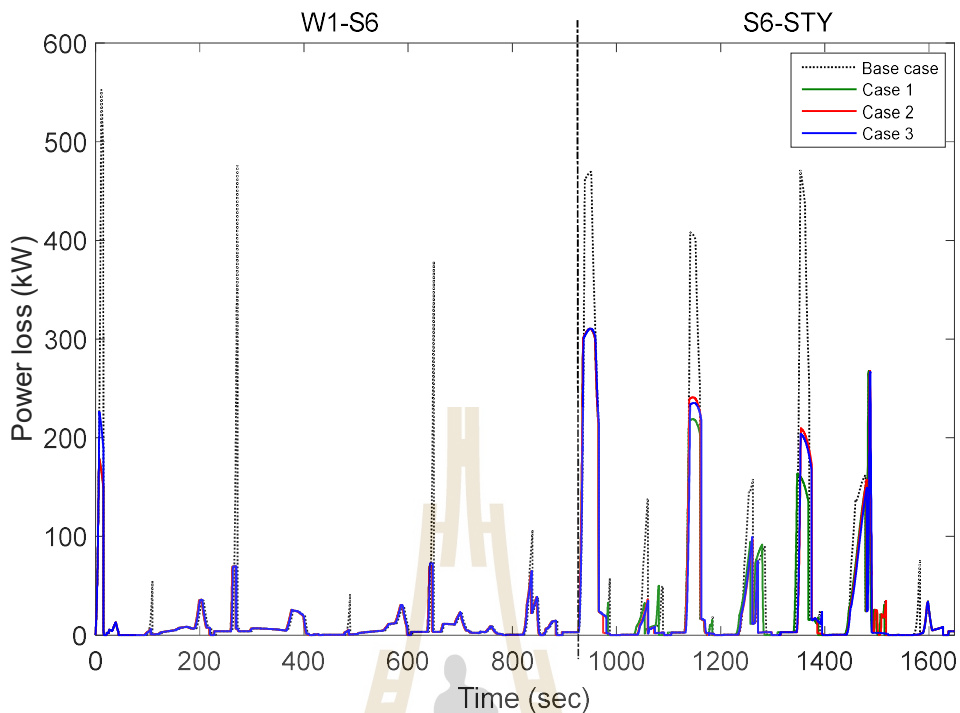
รูปที่ 6.50 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของการทดสอบแต่ละกรณี



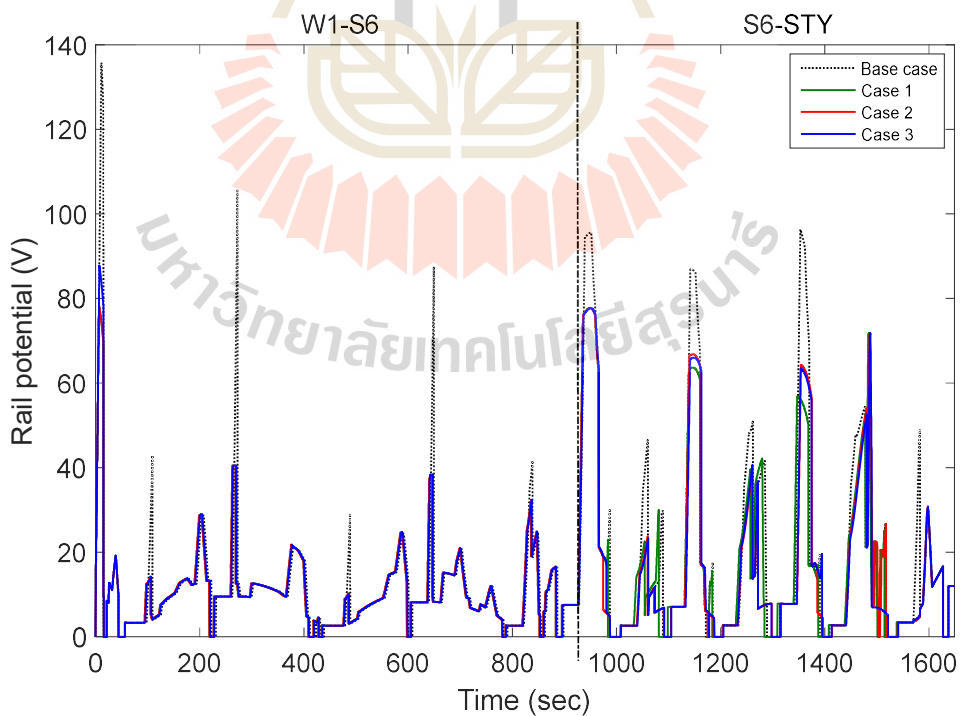
รูปที่ 6.51 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบแต่ละกรณี



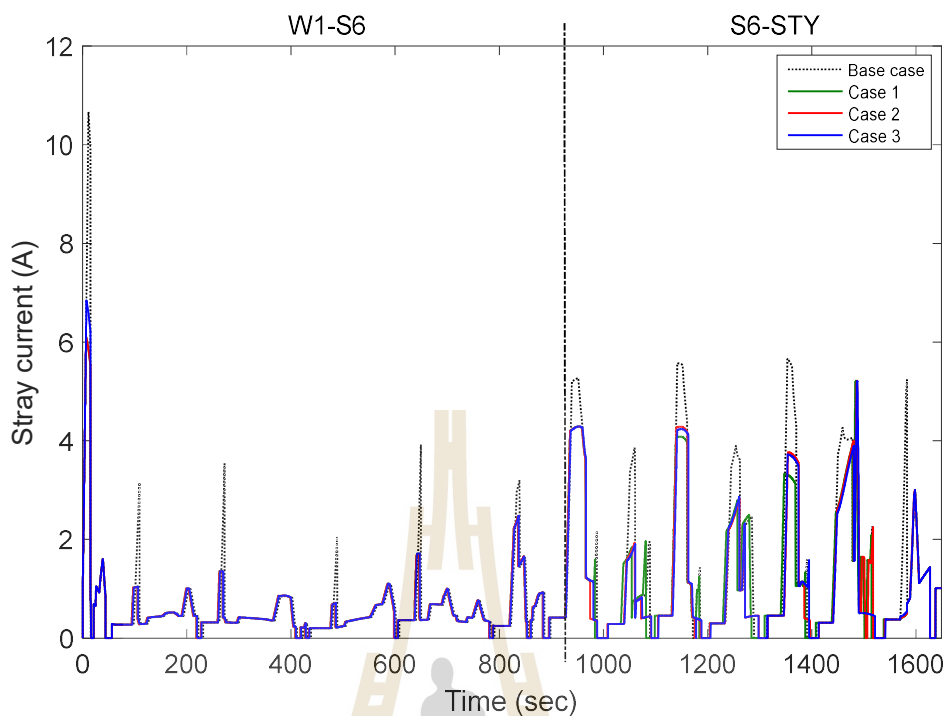
รูปที่ 6.52 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบแต่ละกรณี



รูปที่ 6.53 กำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมของการทดสอบแต่ละกรณี



รูปที่ 6.54 แรงดันไฟฟ้าที่รางของการทดสอบแต่ละกรณี



รูปที่ 6.55 กระแสไฟฟ้ารั่วไหลของการทดสอบแต่ละกรณี

ตารางที่ 6.4 ผลการเปรียบเทียบดัชนีสมรรถนะของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณี

กรณี	E_{tr} (kWh)	E_{sub} (kWh)	E_{loss} (kWh)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	RC (%)
ฐาน	298.95	314.20	15.25	87.55	71.13	-
1	260.90 [12.73%]	271.11 [13.71%]	10.20 [33.07%]	72.15 [17.58%]	0.33 [99.54%]	59.72
2	256.08 [14.34%]	266.29 [15.25%]	10.21 [33.03%]	66.94 [23.54%]	0.63 [99.12%]	71.58
3	255.13 [14.66%]	265.30 [15.56%]	10.16 [33.34%]	66.29 [24.28%]	0.12 [99.83%]	73.76

หมายเหตุ [x%] คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับกรณีฐาน

สัมประสิทธิ์การคืนพลังงานกลับ (Energy Recovery Coefficient: RC) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.10)

$$RC = (E_{sub}^{noess} - E_{sub}^{ess}) / E_{reg} \quad (6.10)$$

จากผลการเปรียบเทียบดัชนีสมรรถนะของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณีดังตารางที่ 6.4 จะพบว่ากรณีที่ 3 จะให้ผลการประหยัดพลังงานทั้งพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด ที่ 14.66% และ 15.56% ตามลำดับ และสามารถช่วยลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้มากที่สุด ที่ 33.34% พลังงานไฟฟ้าคืนกลับของกรณีที่ 3 จะมีเพียง 66.29 kWh ลดลง 24.28% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกของกรณีที่ 3 จะน้อยที่สุด ที่ 0.12 kWh ลดลง 99.83% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การคืนพลังงานกลับ (RC) นั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.10) ซึ่งจากผลการคำนวณจะเห็นว่ากรณีที่ 3 จะมีค่ามากที่สุดที่ 73.76% หมายความว่ากรณีที่ 3 มีการใช้พลังงานคืนกลับเพื่อลดการใช้พลังงานที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด

ตารางที่ 6.5 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ TSS ของการทดสอบแต่ละกรณี

กรณี	$P_{TSS1,max}$ (MW)	$P_{TSS2,max}$ (MW)	$P_{TSS3,max}$ (MW)	$P_{TSS4,max}$ (MW)	$P_{TSS5,max}$ (MW)	$P_{TSS6,max}$ (MW)	$P_{TSS7,max}$ (MW)
ฐาน	3.04	2.00	2.23	2.19	2.18	2.16	2.48
1	1.74 [42.68%]	0.73 [63.49%]	1.75 [21.39%]	1.31 [40.05%]	1.45 [33.62%]	1.56 [27.74%]	1.22 [50.89%]
2	1.74 [42.68%]	0.73 [63.49%]	1.75 [21.39%]	1.31 [40.05%]	1.47 [32.81%]	1.59 [26.12%]	1.22 [50.89%]
3	1.95 [35.85%]	0.73 [63.49%]	1.75 [21.38%]	1.31 [40.06%]	1.48 [31.99%]	1.56 [27.74%]	1.22 [50.95%]

หมายเหตุ [x%] คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับกรณีฐาน

ตารางที่ 6.6 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ TSS ของการทดสอบแต่ละกรณี

กรณี	$V_{TSS1,min}$ (V)	$V_{TSS2,min}$ (V)	$V_{TSS3,min}$ (V)	$V_{TSS4,min}$ (V)	$V_{TSS5,min}$ (V)	$V_{TSS6,min}$ (V)	$V_{TSS7,min}$ (V)
ฐาน	728.85	750.95	746.13	747.02	745.76	746.29	739.30
1	756.22 [-3.75%]	776.20 [-3.36%]	755.96 [-1.32%]	764.83 [-2.38%]	761.23 [-2.07%]	758.94 [-1.70%]	765.97 [-3.61%]
2	756.22 [-3.75%]	776.20 [-3.36%]	755.96 [-1.32%]	764.83 [-2.38%]	760.86 [-2.03%]	758.22 [-1.60%]	765.97 [-3.61%]
3	751.98 [-3.17%]	776.20 [-3.36%]	755.96 [-1.32%]	764.84 [-2.39%]	760.49 [-1.98%]	758.94 [-1.70%]	766.00 [-3.61%]

หมายเหตุ [x%] คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับกรณีฐาน

ตารางที่ 6.7 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของการทดสอบแต่ละกรณี

กรณี	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{tr,avg}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{tr,max}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)
ฐาน	2.830	0.652	614.21	790	135.73	10.67
1	2.517 [11.06%]	0.569 [12.74%]	680.82 [-10.84%]	790 [0%]	78.45 [42.20%]	6.11 [42.69%]
2	2.517 [11.06%]	0.559 [14.35%]	680.82 [-10.84%]	790 [0%]	78.45 [42.20%]	6.11 [42.69%]
3	2.514 [11.17%]	0.557 [14.67%]	676.37 [-10.12%]	790 [0%]	87.78 [35.33%]	6.85 [35.80%]

หมายเหตุ [x%] คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับกรณีฐาน

จากผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของการทดสอบแต่ละกรณีดังตารางที่ 6.5 จะพบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ TSS1 จะลดลง 42.68% ในกรณีที่ 1 และ 2 ส่วนกรณีที่ 3 จะลดลงเพียง 35.85% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าเริ่มต้นของ %SOC ที่ได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดของกรณีที่ 3 มีค่าน้อยกว่ากรณีอื่น แสดงดังตารางที่ 6.3 ส่วนกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ TSS2 TSS3 และ TSS4 จะมีค่าเท่ากัน ยกเว้นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ TSS5 TSS6 และ TSS7 จะมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากตำแหน่งสถานีอยู่ในช่วงที่มีการควบคุม trip time ซึ่งจะเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้ง 3 กรณีนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ TSS ของการทดสอบแต่ละกรณีดังตารางที่ 6.6 จะพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ TSS1 จะเพิ่มขึ้น 3.75% ในกรณีที่ 1 และ 2 ส่วนกรณีที่ 3 จะเพิ่มขึ้นเพียง 3.17% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าเริ่มต้นของ %SOC ที่ได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดของกรณีที่ 3 มีค่าน้อยกว่ากรณีอื่น แสดงดังตารางที่ 6.3 ส่วนแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ TSS2 TSS3 และ TSS4 จะมีค่าเท่ากัน ยกเว้นแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ TSS5 TSS6 และ TSS7 จะมีค่าไม่เท่ากันแต่ก็ใกล้เคียงกันมากเนื่องจากตำแหน่งสถานีอยู่ในช่วงที่มีการควบคุม trip time

จากผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของรถไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของการทดสอบแต่ละกรณีดังตารางที่ 6.7 จะพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือค่ายอดของรถไฟฟ้าในกรณีที่ 3 จะลดลงเหลือเพียง 2.514 MW หรือคิดเป็น 11.17% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน ซึ่งลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น โดยมีกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.557 MW หรือคิดเป็น 14.67% เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเฉลี่ยของกรณีฐาน แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของกรณีที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น

เท่ากับที่ 10.84% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน แต่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของกรณีที่ 3 จะเพิ่มขึ้นน้อยกว่ากรณีอื่น ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดนั้นไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน เนื่องจากพลังงานคืนกลับจากการเบรกทั้งหมดจะไม่ไหลไปยังรางตัวนำ โดยจะถูกจัดการด้วย OBESS และตัวต้านทานการเบรก ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรถไฟไฟฟ้ามียุทธค่าเท่ากับสภาวะไร้โหลด แรงดันไฟฟ้าที่รางสูงสุดของกรณีที่ 1 และ 2 มีค่าลดลงเท่ากับที่ 42.20% ส่วนกรณีที่ 3 ลดลงเพียง 35.33% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน อีกทั้งกระแสไฟฟ้าวัดที่ไร้โหลดของกรณีที่ 1 และ 2 มีค่าลดลงเท่ากับที่ 42.69% ส่วนกรณีที่ 3 ลดลงเพียง 35.80% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน

6.7 กรณีศึกษาการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งที่ใช้การเดินรถแบบไร้ตัวนำสัมผัส

การทดสอบจะพิจารณาการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งที่สถานีผู้โดยสาร S12 (บางหว้า) ซึ่งเป็นสถานีผู้โดยสารสุดท้ายของรถไฟฟ้า BTS สายสีลม ระยะทางรวมไป-กลับ 600 m ดังรูปที่ 6.56 โดยจะทำการหาจำนวน OBESS ติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับการเดินรถแบบไร้ตัวนำสัมผัส (catenary-free operation) เพื่อเดินรถตามเส้นทางดังกล่าวได้ ภายใต้การปรับค่าความเร็วจำกัดจาก 10 km/h จนถึง 40 km/h ผลการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 6.56 เส้นทางเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งที่สถานีผู้โดยสาร S12 (บางหว้า)

ตารางที่ 6.8 ผลการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งโดยใช้การเดินรถแบบไร้ตัวนำสัมผัส ขาขึ้น (up-track)

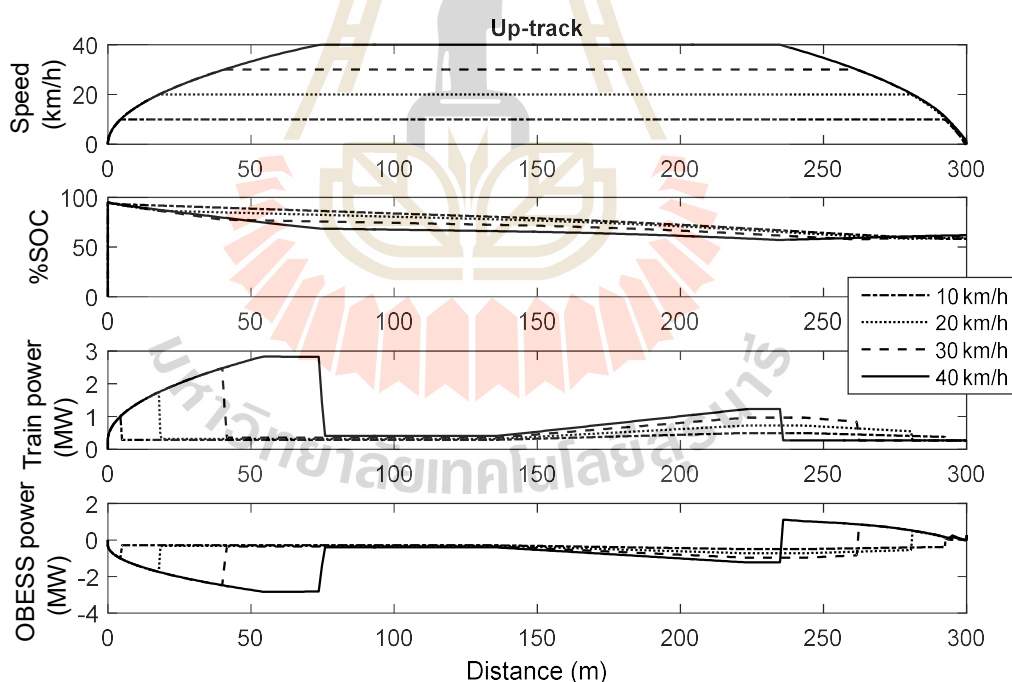
$V_{service}$ (km/h)	N_{ESS}	Up-track							
		E_{tr} (kWh)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sc,max}$ (MW)	$\%SOC_{start}$	$\%SOC_{end}$	Trip time (sec)
10	43	11.5055	0.14995	0	0.99658	0.27	95	58.3878	114.4
15	34	9.3293	0.347	0	1.3747	0.30637	95	58.6841	80.3
20	31	8.644	0.61803	0	1.7474	0.50259	95	59.4079	64.1
25	30	8.597	0.95774	0	2.1161	0.69285	95	59.7264	54.8
30	31	8.9447	1.3659	0	2.479	0.84533	95	60.5791	49.0
35	33	9.5628	1.8254	0	2.829	0.97046	95	61.6198	45.8
40	35	10.1873	2.3414	0	2.8287	1.1157	95	61.8376	41.3

ตารางที่ 6.9 ผลการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งโดยใช้การเดินรถแบบไร้ตัวนำสัมผัส ขาถ่วง (down-track)

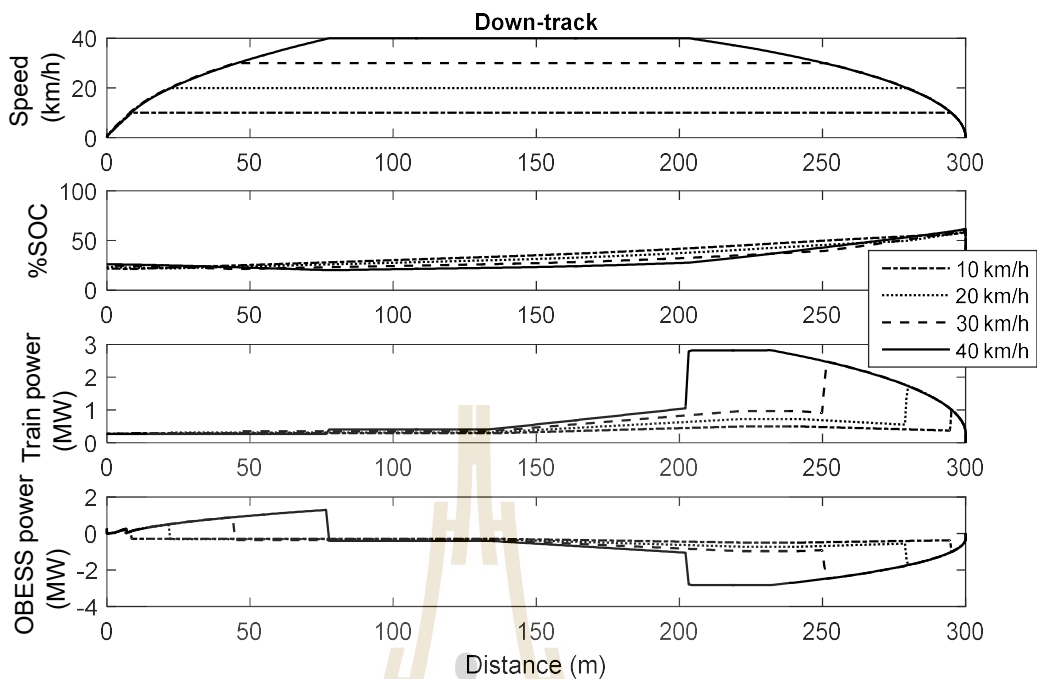
$V_{service}$ (km/h)	N_{ESS}	Down-track							
		E_{tr} (kWh)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sc,max}$ (MW)	$\%SOC_{start}$	$\%SOC_{end}$	Trip time (sec)
10	43	11.642	0.18004	0	1.0022	0.27	58.3878	21.6890	115.4
15	34	9.4441	0.40287	0	1.3765	0.30806	58.6841	22.0413	80.4
20	31	8.846	0.71618	0	1.7354	0.50456	59.4079	23.2081	64.4
25	30	9.0217	1.1197	0	2.1134	0.70109	59.7264	23.4308	56.6
30	31	9.3991	1.6129	0	2.4793	0.89766	60.5791	24.7307	49.3
35	33	10.2476	2.2018	0	2.8225	1.0942	61.6198	26.2332	46.2
40	35	11.4294	2.8834	0	2.8223	1.2908	61.8376	26.0975	45.6

ตารางที่ 6.8 และ 6.9 แสดงผลการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งโดยใช้การเดินรถแบบไร้ตัวนำสัมผัส กรณีขาขึ้นและขาถ่วงตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าที่ความเร็วบริการสูงสุด 25 km/h ใช้จำนวน OBESS มอดุลที่ต้องติดตั้งน้อยที่สุด คือ 30 มอดุล ใช้เวลาในการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่ง 111.4 วินาที โดยจำนวนมอดุลที่ติดตั้งนี้หามาจากการแปรค่าจำนวนมอดุลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าจะเพียงพอสำหรับการเคลื่อนที่กลับมายังสถานีผู้โดยสาร และ $\%SOC_{end}$ มีค่ามากกว่าข้อจำกัดต่ำที่สุดของค่า SOC ที่ใช้ได้ของ OBESS ที่กำหนดไว้คือ 20% แต่เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ ที่ความเร็วบริการสูงสุดเท่ากับ 20 km/h จะใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งน้อยที่สุด คือ 17.49 kWh เมื่อเทียบกับความเร็วบริการสูงสุดอื่น ๆ ด้วยเวลา 128.5 วินาที โดย

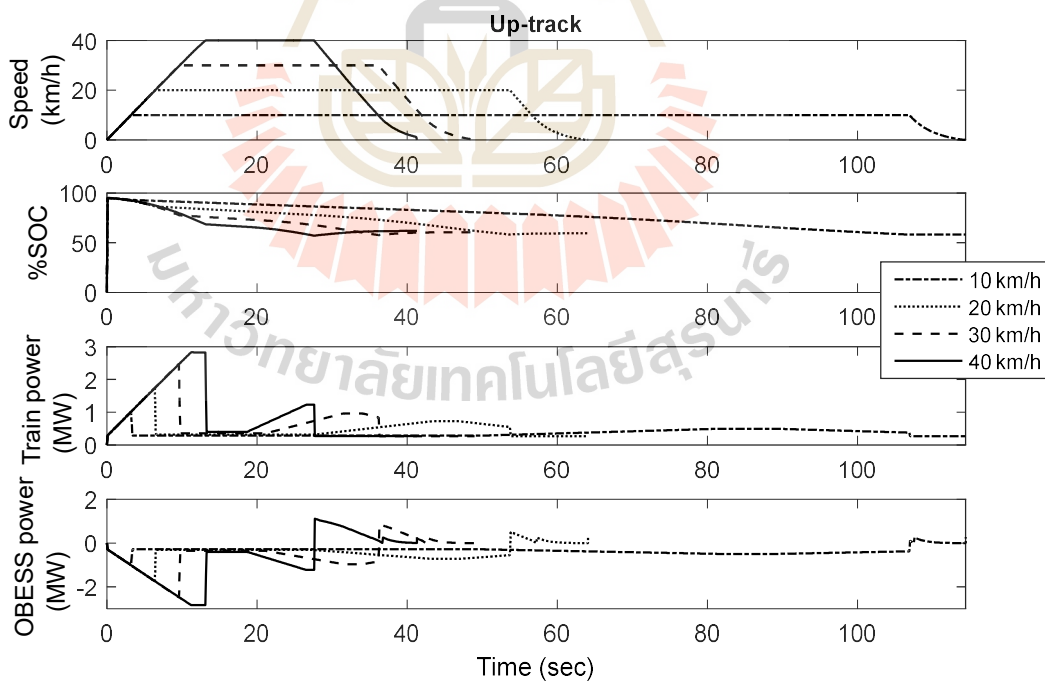
ต้องติดตั้ง OBESS จำนวน 31 มอดูล ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความเร็วบริการสูงสุดที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับพิจารณาประเด็นใดเป็นเรื่องสำคัญหลัก เช่น ถ้าพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้ง OBESS ควรให้บริการที่ความเร็วสูงสุด 25 km/h เนื่องจากใช้จำนวน OBESS มอดูลน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น และใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินรถ 17.62 kWh แต่ถ้าพิจารณาถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่ง ควรให้บริการที่ความเร็วสูงสุด 20 km/h เนื่องจากใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น แต่ต้องติดตั้ง OBESS จำนวน 31 มอดูล ผลการเปรียบเทียบโครงสร้างความเร็ว %SOC กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและ OBESS เทียบกับระยะทางและเวลาทั้งขาขึ้นและขาล่อง แสดงดังรูปที่ 6.57-6.60 ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วบริการเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ก็จะเพิ่มขึ้นตาม ส่วน %SOC ก็จะค่อย ๆ ลดลงตามพลังงานไฟฟ้าที่ถูกดึงไปใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม OBESS ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับกรณีการเดินรถแบบไม่ใช้แหล่งจ่ายไฟจากรางตัวนำ เนื่องจากต้องใช้ OBESS มอดูลจำนวนมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง ไม่คุ้มค่าที่จะลงทุนเมื่อเทียบกับการใช้แหล่งจ่ายไฟจากรางตัวนำ



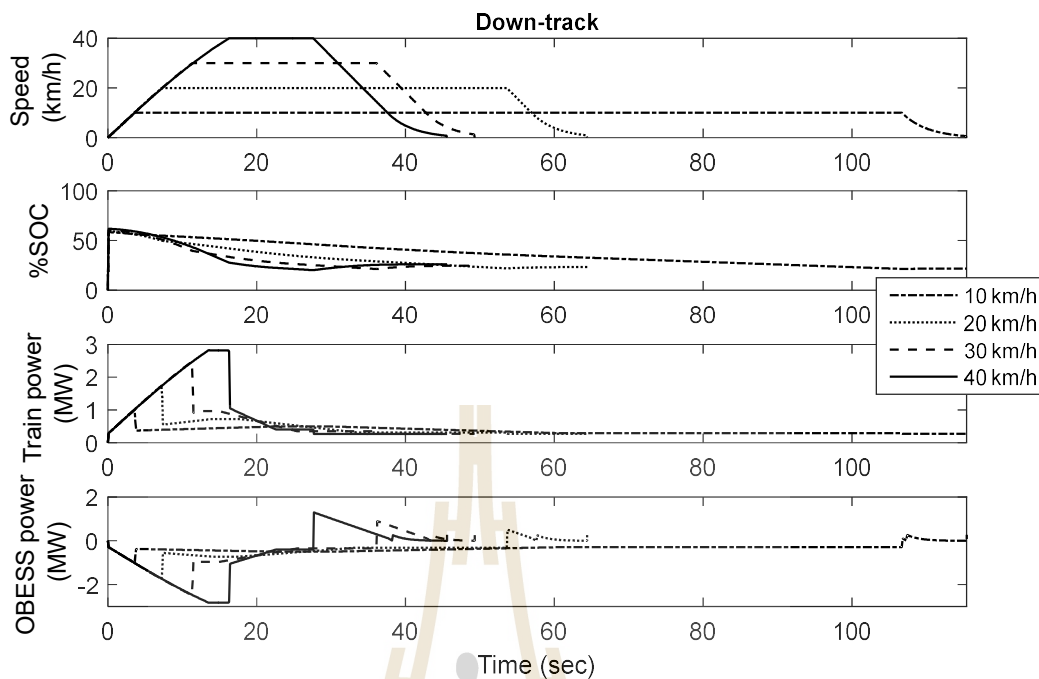
รูปที่ 6.57 โครงร่างความเร็ว %SOC กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและ OBESS เทียบกับระยะทาง (ขาขึ้น)



รูปที่ 6.58 โครงร่างความเร็ว %SOC กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและ OBESS เทียบกับระยะทาง (ขาล่อง)



รูปที่ 6.59 โครงร่างความเร็ว %SOC กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและ OBESS เทียบกับเวลา (ขาขึ้น)



รูปที่ 6.60 โครงร่างความเร็ว %SOC กำลังไฟฟ้าของรถไฟและ OBESS เทียบกับเวลา (จำลอง)

6.8 สรุป

บทนี้นำเสนอการทดสอบและผลการทดสอบการประหยัดพลังงานเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนร่วมกับ OBESS โดยใช้กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด จากผลการทดสอบพบว่ากลยุทธ์ที่นำเสนอสามารถช่วยทำให้ประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้าได้เป็นอย่างดีร่วมกับวิธีการควบคุมเวลาเดินรถที่เหมาะสม รวมทั้งได้นำเสนอกรณีศึกษาการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งโดยใช้การเดินรถแบบไร้ตัวนำสัมผัส ซึ่งผลการทดสอบกรณีศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าไม่เหมาะที่จะนำ OBESS มาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับการเดินรถเปลี่ยนทางวิ่งดังกล่าว เนื่องจากต้องใช้เงินลงทุนสำหรับติดตั้ง OBESS สูงถึงแม้ว่าจะช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินรถก็ตาม

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการดำเนินงาน

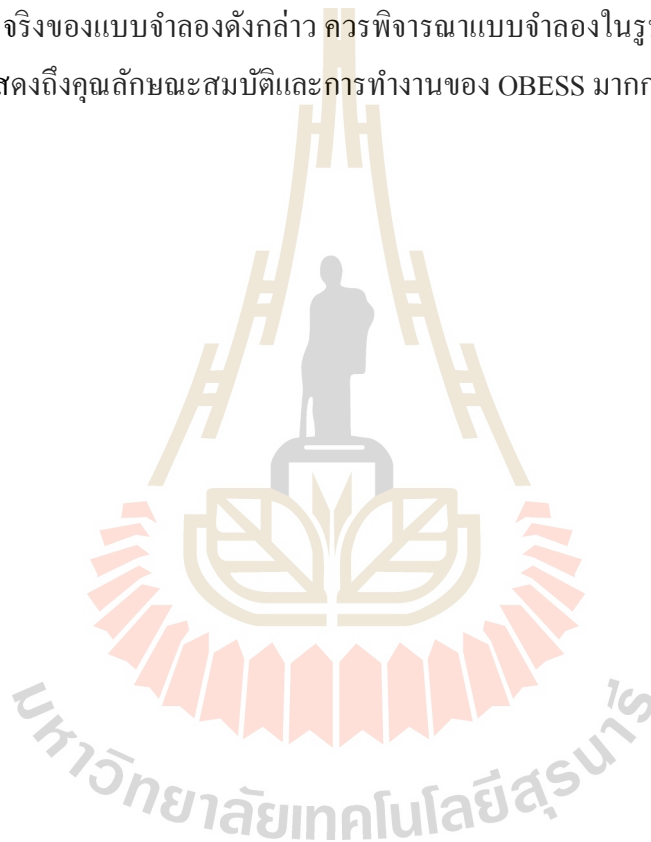
วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอกลยุทธ์ใหม่สำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นในรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน โดยพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนที่ติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นบนขบวนรถและพัฒนากลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด ซึ่งเป็นกลยุทธ์แนวทางใหม่สำหรับการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น ภายใต้เงื่อนไขการลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟในช่วงเร่งและการใช้พลังงานโดยรวมน้อยที่สุด ด้วยโปรแกรม MATLAB นำมาทดสอบและประเมินผลกับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนในประเทศไทย ได้แก่ รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบกับกลยุทธ์เดิม 3 กลยุทธ์ จากงานวิจัยก่อนหน้า คือ กลยุทธ์ควบคุมการตัดค่ายอดของกำลังไฟฟ้า กลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน และกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ จากผลการเปรียบเทียบพบว่า กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอดที่พัฒนา สามารถนำไปใช้จัดการพลังงานคืนกลับได้เป็นอย่างดีและมีประสิทธิภาพ ให้ผลการลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดของรถไฟในช่วงเร่งและการใช้พลังงานโดยรวมดีกว่ากลยุทธ์เดิม แสดงดังตารางที่ 5.2 รวมทั้งนำเสนอการประหยัดพลังงานเหมาะที่สุดสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชนร่วมกับ OBESS โดยใช้กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอดที่พัฒนาร่วมกับวิธีการควบคุม trip time 3 วิธี ได้แก่ การควบคุมการหน่วงผ่านตัวปรับคลื่น k_{dec} การควบคุมจุดเริ่มโหมดการแล่นผ่าน L_{coast} และการควบคุมการหน่วงร่วมกับการควบคุมจุดเริ่มโหมดการแล่นผ่าน k_{dec} ร่วมกับ L_{coast} โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด และเปรียบเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้ง OBESS จากผลการทดสอบพบว่ากลยุทธ์ที่นำเสนอร่วมกับวิธีการควบคุม trip time ผ่านการควบคุมการเบรกร่วมกับการควบคุมจุดเริ่มโหมดการแล่น สามารถช่วยทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ถึง 15.56% และลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ถึง 63.49% ที่ TSS2 เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้ง OBESS อีกทั้งยังใช้จำนวนมอดูลติดตั้งน้อยกว่ากรณีอื่นอีกด้วย

นอกจากนี้ยังได้นำเสนอกรณีศึกษาการเดินทางวิ่งโดยใช้การเดินทางแบบไร้ตัวนำสัมผัส ซึ่งผลการทดสอบกรณีศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าไม่เหมาะที่จะนำ OBESS มาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับการเดินทางวิ่งดังกล่าว เนื่องจากต้องใช้เงินลงทุนสำหรับติดตั้ง

OBESS สูง ตามจำนวนมอดูลที่เหมาะสมในแต่ละความเร็วบริการที่นำเสนอตั้งตารางที่ 6.8 และ 6.9 ถึงแม้ว่าจะช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินรถก็ตาม

7.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาแบบจำลองของโหนดรถไฟอย่างง่ายในรูปของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยพิจารณาแบบจำลองของ OBESS ในรูปแบบของการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อนำไปคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่เท่านั้น เพื่อให้มีความละเอียดและสมจริงของแบบจำลองดังกล่าว ควรพิจารณาแบบจำลองในรูปของวงจรทางไฟฟ้าหรือวงจรสมมูลที่แสดงถึงคุณลักษณะสมบัติและการทำงานของ OBESS มากกว่านี้



รายการอ้างอิง

- ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์. (2557). การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน. *วิศวกรรมสาร*. 67(3): 64-72.
- ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์. (2557). แบบจำลองและการจำลองผลระบบการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าหลายขบวน. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์. (2557). ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรางรถไฟสายหลัก. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชนิดชัย กุลวรรณิขพงษ์. (2557). หัวรถจักรไฟฟ้าและการขับเคลื่อนมอเตอร์ลากจูง. เอกสารประกอบการสอน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นคร จันทสร. (2555). ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 2.
- วรวิศ กอปรสิริพัฒน์ (2556). ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors): อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่กำลังมาแรง. *TEMCA magazine*. 21(2): 75-78.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- Arboleya, P., Bidaguren, P., and Armendariz, U. (2016). Energy is on board: energy storage and other alternatives in modern light railways. *IEEE Electrification Magazine*. 4(3): 30-41.
- Barrero, R., Mierlo, J.V., and Tackoen, X. (2008). Energy savings in public transport. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 3(3): 26-36.
- Barrero, R., Tackoen, X., and Mierlo J.V. (2010). Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 224: 207–225.
- Battistelli, L., Ciccarelli, F., Lauria, D., and Proto, D. (2009). Optimal design of DC electrified railway stationary storage system. In *Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power* (pp. 739-745). Capri, Italy.

- Bocharnikov, Y.V., Tobias, A.M., Roberts, C., Hillmansen, S., and Goodman, C.J., (2007). Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. **IET Electric Power Applications**. 1(5): 675-682.
- Bombardier Inc. (2009). **EcoActive Technology-MITRAC Energy Saver**. datasheet, Zurich, Switzerland.
- BS EN 50163. (2004). **Railway applications-Supply voltages of traction systems**. British Standards Institution. London, UK.
- Chymera, M., Renfrew, A., and Barnes, M. (2008). Analyzing the potential of energy storage on electrified transit systems. In **Proceedings of 8th World Congress of Railway Research** (pp. 1-10). Seoul, South Korea.
- Ciccarelli, F., Iannuzzi, D., and Tricoli, P. (2012). Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. 24: 36–49.
- Wang, D.W., Zhao, K., Wang, S.R., Yang, Z.P., and You, X.J. (2011). Power distribution control strategy of on-board supercapacitor energy storage system of railway vehicle. In **Proceeding of International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment (ICMREE)** (pp. 664-668). Shanghai, China.
- Domínguez, M., Cucala, A.P., Fernández, A., Pecharromán, R.R., and Blanquer, J. (2011). Energy efficiency on train control – design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices. In **Proceedings of 9th World Congress on Railway Research** (pp. 1-12). Lille, France.
- Domínguez, M., Fernández-Cardador, A., Cucala, A.P., and Pecharromán, R. R. (2012). Energy Savings in Metropolitan Railway Substations Through Regenerative Energy Recovery and Optimal Design of ATO Speed Profiles. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**. 9(3): 496-504.
- Gee, A.M., and Dunn, R.W. (2015). Analysis of trackside flywheel energy storage in light rail systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. 64(9): 3858-3869.
- Gonzalez-Gil, A., Palacin, R., Batty, P., and Powell, J.P. (2014). Energy-efficient urban rail system: strategies for an optimal management of regenerative braking energy. In

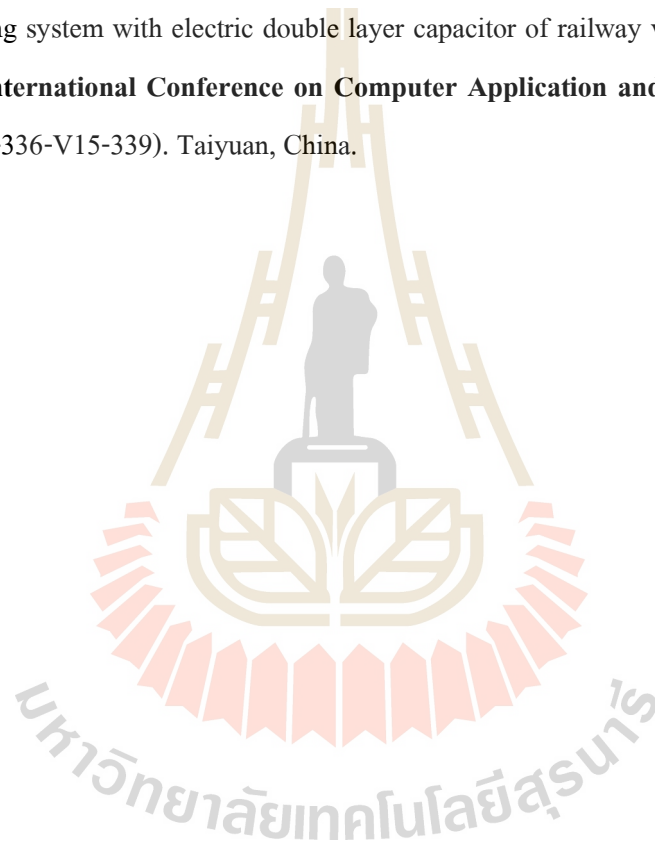
- Proceedings of the 5th Conference Transport Research Arena (TRA)** (pp.1-9). Paris, France.
- Grigans, L., and Latkovskis, L. (2010). Study of control strategies for energy storage system on board of urban electric vehicles”, In **Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference** (pp. T9-34-T9-38). Ohrid, Macedonia.
- Iannuzzi D., and Tricoli P. (2010). Metro trains equipped onboard with supercapacitors: a control technique for energy saving. In: **Proceedings of International symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion**, (pp. 750-756). Pisa, Italy.
- Iannuzzi, D., and Tricoli, P. (2010). Optimal Control Strategy of Onboard Supercapacitor Storage System for Light Railway Vehicles. In **Proceeding of 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics** (pp. 280-285). Bari, Italy.
- Iannuzzi, D., and Tricoli, P. (2012). Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains With Onboard Supercapacitors. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 27(4): 2129-2140.
- Jung, B., Kim, H., Kang, H and Lee, H. (2014). Development of a Novel Charging Algorithm for On-board ESS in DC Train through Weight Modification. **Journal of Electrical Engineering & Technology**. 9(6): 1795-1804.
- Khayyam, S., Lakhdar, H., Ponci, F., and Monti, A. (2015). Agent based energy management in railways. In **Proceedings of International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles** (pp. 1-6). Aachen, Germany.
- Kim, K. (2010). **Optimal train control on various track alignments considering speed and schedule adherence constraints**. PhD Thesis. New Jersey Institute of Technology. USA. January.
- Kulworawanichpong, T. (2015). Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method. **Journal of Modern Transportation**. 23(4): 241–251.
- Kulworawanichpong, T. (2003). **Optimising AC electric railway power flows with power electronic control**. PhD Thesis. University of Birmingham. UK. November.

- Lee, H., Kim, G., and Lee, C. (2008). Development of ESS for regenerative energy of electric vehicle. In **Proceedings of 8th world congress on railway research** (pp. 1-6). Seoul, Korea.
- Lee, H., Song, J., Lee, H., Lee, C., Jang, G., and Kim, G. (2011). Capacity optimization of the supercapacitor energy storages on DC railway system using a railway powerflow algorithm. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control**. 7(5B): 2739-2753.
- Lee, H.M., Jang, D.U., and Hong, J.S. (2014). A study on energy application of electric train. In **Proceedings of 14th International Conference on Control, Automation and Systems** (pp. 1640-1642). Gyeonggi-do, Korea.
- Lee, H.M., Jeong, E.J., and Jeong, S.C. (2010). A study on calculation of DC railway loadflow with energy storage system. In **Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems**. (pp. 800-803). Gyeonggi-do, Korea.
- Leeton, U., Kulworawanichpong, T., and Watanabe, T. (2012). Energy saving in DC electric railway with regenerative energy storage. In **Proceedings of the 2013 Annual Meeting of the Institute of Electrical Engineering of Japan (IEEJ)** (pp. 198-199). Nagoya, Japan.
- Lu, S. (2011). **Optimising power management strategies for railway traction**. PhD Thesis. University of Birmingham. UK. October.
- Masamichi, O. (2010). Onboard storage in Japanese electrified lines. In **Proceeding of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference** (pp. 9-16). Ohrid, Macedonia.
- Matsuda, K., Ko, H., and Miyatake, M. (2006). Train operation minimizing energy consumption in DC electric railway with on-board energy storage device. In **Proceeding of the Tenth International Conference on Computers in Railways X**. (pp. 767-776). Prague, Czech Republic.
- Miyatake, M., Haga, H., and Suzuki, S. (2009). Optimal speed control of a train with on-board energy storage for minimum energy consumption in catenary free operation. In **Proceedings of 13th European Conference on Power Electronics and Applications**. (pp. 1-9). Barcelona, Spain.

- Miyatake, M., and Ko, H. (2010). Optimization of train speed profile for minimum energy consumption. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronics Engineering**. 5(3): 263-269.
- Miyatake, M., Matsuda, K., and Haga, H. (2006). Charge/discharge control of a train with on-board energy storage devices for energy minimization and consideration of catenary free operation. In **Proceeding of International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems** (pp. 339-348). Toledo, Spain.
- Miyoshi, M., Takeba, T., and Miyatake, M. (2012). Development of an energy efficient train traffic control system for saving electricity. In **Proceedings of International Conference on Design and Operation in Railway Engineering** (pp.499-510). New Forest, United Kingdom.
- Moreno, J., Ortuzar, M., and Dixon, J. (2006). Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 53(2): 614-623.
- Nash, A., and Huerlimann, D. (2003). **Opentrack-simulation of railway networks**. user manual version 1.3. Institute for Transportation Planning and Systems, ETH Zurich, Switzerland.
- Okada, Y., Koseki, T., and Hisatomi, K. (2004). Power management control in DC-electrified railways for the regenerative braking systems of electric trains, In **Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Mass Transit Systems (COMPRAIL IX)** (pp. 919–929). Dresden, Germany.
- Ratniyomchai, T., Hillmanssen, S., and Tricoli, P. (2014). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. **IET Electrical Systems in Transportation**. 4(1): 9-20.
- Rochard, B.P., and Schmid, F. (2000). A review of methods to measure and calculate train resistances. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**. 214(4): 185-199.

- Shimada, M., Oishi, R., Araki, D., and Nakamura, Y. (2010). Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways. **Hitachi Review**. 59(1): 33-38.
- Shen, X.J., Chen, S., Li, G., and Zhang, Y. (2013). Configure methodology of onboard supercapacitor array for recycling regenerative braking energy of URT vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 49(4): 1678-1686.
- Sheu, J.W., and Lin, W.S. (2012). Energy-saving automatic train regulation using dual heuristic programming. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. 61(4): 1503-1514.
- Sumpavakup, C., and Kulworawanichpong, T. (2015). "Multi-train movement simulation using MATLAB object-oriented programming. **Applied Mechanics and Materials**. 763: 153-158.
- Sumpavakup, C., and Kulworawanichpong, T. (2014). Optimizing Train Speed Profile for a Mass Transit System Using Differential Evolution. **Research and Development Journal**. 25(4): 59-69.
- Sumpavakup, C., Ratniyomchai, T., and Kulworawanichpong, T. (2017). Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy. **Journal of Modern Transportation**. 1-13.
- Takagi, R., and Amano, T. (2014). Optimisation of reference state-of-charge curves for the feed-forward charge/discharge control of energy storage systems on-board DC electric railway vehicles. **IET Electrical Systems in Transportation**. 5(1): 33-42.
- Talla, J., Streit, L., Peroutka, Z., Drabek, P., and Blahnik, V. (2015). Fuzzy energy management strategy for tram with supercapacitors", In **Proceedings of 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society** (pp. 003963-003968). Yokohama, Japan.
- Vazquez, S., Lukic, S.M., Galvan, E., and Franquelo, L.G., Carrasco J.M. (2010). Energy storage systems for transport and grid applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 17: 3881-3895.
- Wang, W., Cheng, M., Wang, Y., Zhang, B., Zhu, Y., Ding, S., and Chen, W. (2014). A novel energy management strategy of onboard supercapacitor for subway applications with permanent-magnet traction system. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. 63(6): 2578-2588.

- Xia, H., Yang, Z., Lin, F., and Chen, H. (2015). Modeling and state of charge-based energy management strategy of ultracapacitor energy storage system of urban rail transit. In **Proceedings of 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society** (pp. 002083-002087). Yokohama, Japan.
- Xu, G., Li, W., Xu, K., and Song, Z. (2011). An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles. **Energies**. 4(9): 1461-1477.
- Zhao, K., Wang, X., Yang, Z., and You, X. (2010). Study and simulation of on-board energy saving system with electric double layer capacitor of railway vehicle”, In **Proceedings of International Conference on Computer Application and System Modeling** (pp. V15-336-V15-339). Taiyuan, China.



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบกลยุทธ์การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดแต่ละวิธี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมการตัดจ่ายของกำลังไฟฟ้า

SOC_{start} (%)	l	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
20	0.1	266.0271	252.4536	13.57356	70.20993	2.041930	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.2	265.4386	252.3915	13.04713	70.20993	1.952014	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.3	264.9428	252.4457	12.49712	70.20993	2.030509	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.4	264.3419	252.4168	11.92510	70.20993	1.988653	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.5	263.8898	252.4584	11.43132	70.20993	2.048964	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.6	262.7262	252.4454	10.28076	70.20993	2.030122	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.7	267.1588	256.8275	10.33123	70.20993	8.376488	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.8	280.8454	268.6698	12.17566	70.20993	25.52698	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.9	291.7909	277.9083	13.88255	70.20993	38.90675	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	299.1600	283.9817	15.17829	70.20993	47.70243	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
30	0.1	265.2775	251.7576	13.51985	70.20993	2.034036	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.2	264.7284	251.7504	12.97795	70.20993	2.023561	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.3	264.1461	251.7500	12.39614	70.20993	2.022969	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.4	263.5425	251.7445	11.79809	70.20993	2.014934	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.5	263.0026	251.7456	11.25703	70.20993	2.016622	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.6	261.8446	251.7700	10.07452	70.20993	2.051988	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.7	266.2153	256.1367	10.07857	70.20993	8.375977	2.826891	3.015703	617.9094	729.2758	132.8556	12.64316	95	1538.7
	0.8	279.8703	267.9781	11.89224	70.20993	25.52522	2.822918	2.978302	625.5231	730.0963	126.9159	12.14179	95	1538.7

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมการตัดจ่ายของกำลังไฟฟ้า (ต่อ)

SOC_{start} (%)	l	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.9	291.288	277.5625	13.72547	70.20993	39.40592	2.54664	2.671515	634.7816	736.7522	119.8747	11.35369	95	1538.7
	1	299.16	283.9817	15.17829	70.20993	48.70243	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
40	0.1	264.5123	251.0677	13.44463	70.20993	2.034838	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.2	263.9344	251.0548	12.87965	70.20993	2.016088	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.3	263.3271	251.0667	12.26041	70.20993	2.033312	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.4	262.6661	251.0503	11.61578	70.20993	2.009592	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.5	262.1105	251.0621	11.04833	70.20993	2.026755	2.828583	3.026601	615.8429	729.0363	134.466	12.77922	95	1538.7
	0.6	260.9198	251.0809	9.838916	70.20993	2.053975	2.824868	2.999584	621.0994	729.6296	130.3683	12.43319	95	1538.7
	0.7	265.3308	255.4847	9.846091	70.20993	8.43178	2.430481	1.996011	673.5327	750.9693	89.971	8.487504	95	1538.7
	0.8	279.7263	267.8735	11.85285	70.20993	26.37379	2.430481	2.325824	654.5431	744.1002	104.6288	9.887696	95	1538.7
	0.9	291.288	277.5625	13.72547	70.20993	40.40592	2.54664	2.671515	634.7816	736.7522	119.8747	11.35369	95	1538.7
	1	299.16	283.9817	15.17829	70.20993	49.70243	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
50	0.1	263.6901	250.3487	13.34139	70.20993	1.993491	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.2	263.1093	250.3693	12.74001	70.20993	2.023425	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.3	262.4633	250.3557	12.10762	70.20993	2.003613	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.4	261.7788	250.3589	11.41994	70.20993	2.008242	2.827713	3.021153	616.869	729.156	133.6665	12.71166	95	1538.7
	0.5	261.2388	250.3954	10.84342	70.20993	2.061111	2.824313	2.994254	622.1867	729.7466	129.5201	12.3616	95	1538.7
	0.6	260.103	250.4601	9.642968	70.20993	2.154807	2.802497	1.872963	656.4492	752.3341	95.09536	7.132616	95	1538.7

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมการตัดจ่ายของกำลังไฟฟ้า (ต่อ)

SOC_{start} (%)	l	E_{sub} (kWh)	E_r (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.7	265.3308	255.4847	9.846091	70.20993	9.43178	2.430481	1.996011	673.5327	750.9693	89.971	8.487504	95	1538.7
	0.8	279.7263	267.8735	11.85285	70.20993	27.37379	2.430481	2.325824	654.5431	744.1002	104.6288	9.887696	95	1538.7
	0.9	291.288	277.5625	13.72547	70.20993	41.40592	2.54664	2.671515	634.7816	736.7522	119.8747	11.35369	95	1538.7
	1	299.16	283.9817	15.17829	70.20993	50.70243	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
60	0.1	262.9231	249.6877	13.23541	70.20993	2.036297	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.2	262.2871	249.6786	12.60855	70.20993	2.023002	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.3	261.6163	249.6847	11.93161	70.20993	2.031864	2.829585	3.021153	616.869	729.156	133.6665	12.71166	95	1538.7
	0.4	260.8895	249.6529	11.23664	70.20993	1.985862	2.825796	2.996029	621.8229	729.7076	129.8039	12.38555	95	1538.7
	0.5	260.3408	249.6955	10.64527	70.20993	2.047517	2.819125	2.113646	655.7529	747.2019	95.58558	6.633847	95	1538.7
	0.6	260.103	250.4601	9.642968	70.20993	3.154807	2.802497	1.872963	656.4492	752.3341	95.09536	7.132616	95	1538.7
	0.7	265.3308	255.4847	9.846091	70.20993	10.43178	2.430481	1.996011	673.5327	750.9693	89.971	8.487504	95	1538.7
	0.8	279.7263	267.8735	11.85285	70.20993	28.37379	2.430481	2.325824	654.5431	744.1002	104.6288	9.887696	95	1538.7
	0.9	291.288	277.5625	13.72547	70.20993	42.40592	2.54664	2.671515	634.7816	736.7522	119.8747	11.35369	95	1538.7
	1	299.16	283.9817	15.17829	70.20993	51.70243	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
70	0.1	262.074	248.9724	13.1016	70.20993	2.000319	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.2	261.419	248.9845	12.43455	70.20993	2.017769	2.829585	3.022982	616.5245	729.1158	133.9349	12.73435	95	1538.7
	0.3	260.7307	248.9919	11.7388	70.20993	2.028514	2.829585	2.997805	621.4604	729.6687	130.0866	12.40942	95	1538.7
	0.4	260.0002	248.9481	11.05209	70.20993	1.965122	2.825796	2.969432	627.4255	730.2906	125.4302	12.01631	95	1538.7

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมการตัดจ่ายของกำลังไฟฟ้า (ต่อ)

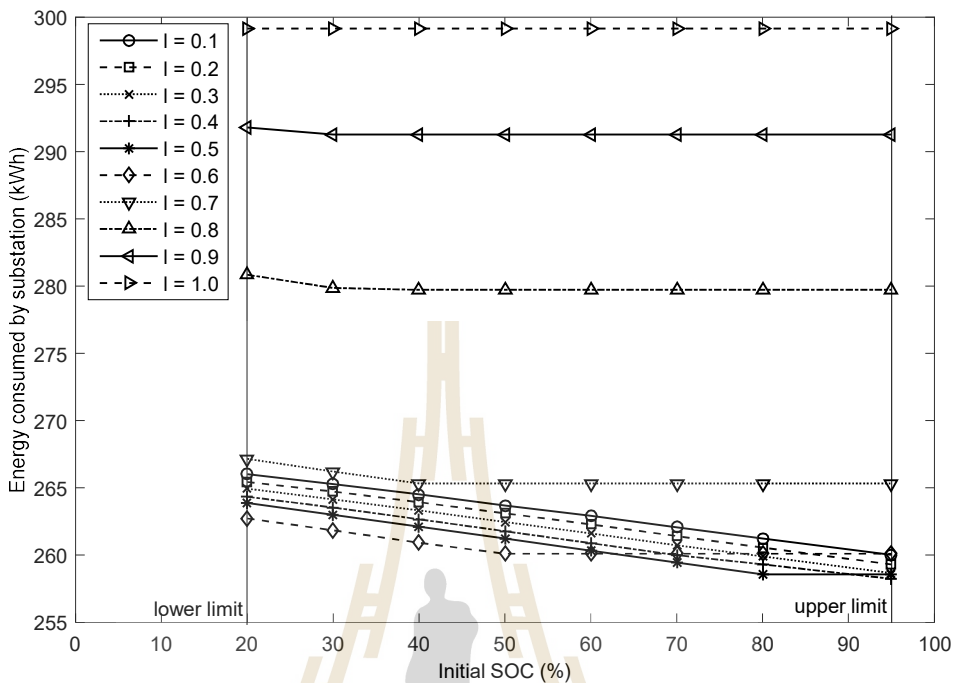
SOC_{start} (%)	l	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.5	259.4542	248.994	10.46022	70.20993	2.031617	2.817899	2.113646	655.7529	747.2019	95.58558	6.633847	95	1538.7
	0.6	260.103	250.4601	9.642968	70.20993	4.154807	2.802497	1.872963	656.4492	752.3341	95.09536	7.132616	95	1538.7
	0.7	265.3308	255.4847	9.846091	70.20993	11.43178	2.430481	1.996011	673.5327	750.9693	89.971	8.487504	95	1538.7
	0.8	279.7263	267.8735	11.85285	70.20993	29.37379	2.430481	2.325824	654.5431	744.1002	104.6288	9.887696	95	1538.7
	0.9	291.2880	277.5625	13.72547	70.20993	43.40592	2.54664	2.671515	634.7816	736.7522	119.8747	11.35369	95	1538.7
	1	299.1600	283.9817	15.17829	70.20993	52.70243	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
80	0.1	261.2312	248.2767	12.95456	70.20993	1.992713	2.829585	3.02827	615.5134	728.9996	134.7227	12.80085	95	1538.7
	0.2	260.5699	248.2937	12.27623	70.20993	2.017337	2.829585	3.003145	620.3813	729.5515	130.9284	12.48045	95	1538.7
	0.3	259.9068	248.3123	11.59448	70.20993	2.044396	2.829585	2.976529	625.9008	730.1351	126.6210	12.11689	95	1538.7
	0.4	259.3131	248.2944	11.01871	70.20993	2.018379	2.825092	2.2152	655.7529	746.4192	95.58558	6.792638	95	1538.7
	0.5	258.5681	248.2935	10.27457	70.20993	2.017165	2.817899	2.113646	655.7529	747.2019	95.58558	6.633847	95	1538.7
	0.6	260.1030	250.4601	9.642968	70.20993	5.154807	2.802497	1.872963	656.4492	752.3341	95.09536	7.132616	95	1538.7
	0.7	265.3308	255.4847	9.846091	70.20993	12.43178	2.430481	1.996011	673.5327	750.9693	89.97100	8.487504	95	1538.7
	0.8	279.7263	267.8735	11.85285	70.20993	30.37379	2.430481	2.325824	654.5431	744.1002	104.6288	9.887696	95	1538.7
	0.9	291.2880	277.5625	13.72547	70.20993	44.40592	2.54664	2.671515	634.7816	736.7522	119.8747	11.35369	95	1538.7
	1	299.1600	283.9817	15.17829	70.20993	53.70243	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
95	0.1	260.0153	247.2748	12.74043	70.20993	2.041836	2.829585	3.001363	620.7396	729.5906	130.6489	12.45686	95	1538.7
	0.2	259.3043	247.2591	12.04519	70.20993	2.018993	2.829585	2.974756	626.2799	730.174	126.3250	12.09189	95	1538.7

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมการตัดจ่ายของกำลังไฟฟ้า (ต่อ)

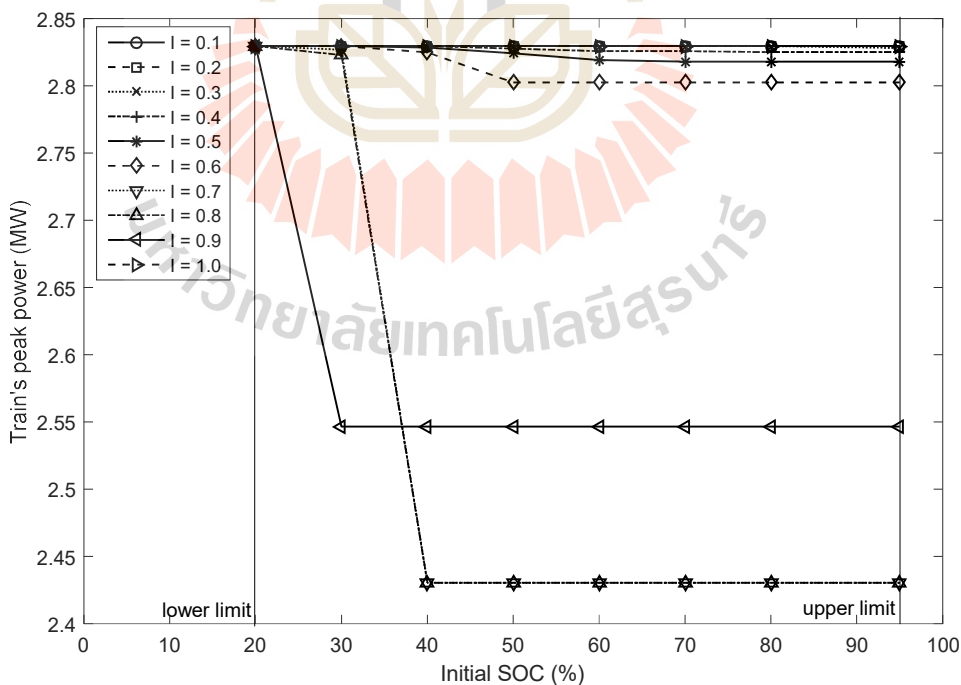
SOC_{start} (%)	l	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.3	258.6667	247.2667	11.39998	70.20993	2.030081	2.828164	2.228918	655.7529	746.1324	95.58558	6.862664	95	1538.7
	0.4	258.2373	247.2633	10.97398	70.20993	2.025182	2.825092	2.19818	655.7529	746.7239	95.58558	6.792638	95	1538.7
	0.5	258.5681	248.2935	10.27457	70.20993	3.517165	2.817899	2.113646	655.7529	747.2019	95.58558	6.633847	95	1538.7
	0.6	260.103	250.4601	9.642968	70.20993	6.654807	2.802497	1.872963	656.4492	752.3341	95.09536	7.132616	95	1538.7
	0.7	265.3308	255.4847	9.846091	70.20993	13.93178	2.430481	1.996011	673.5327	750.9693	89.97100	8.487504	95	1538.7
	0.8	279.7263	267.8735	11.85285	70.20993	31.87379	2.430481	2.325824	654.5431	744.1002	104.6288	9.887696	95	1538.7
	0.9	291.2880	277.5625	13.72547	70.20993	45.90592	2.54664	2.671515	634.7816	736.7522	119.8747	11.35369	95	1538.7
	1	299.1600	283.9817	15.17829	70.20993	55.20243	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.88610	95	1538.7



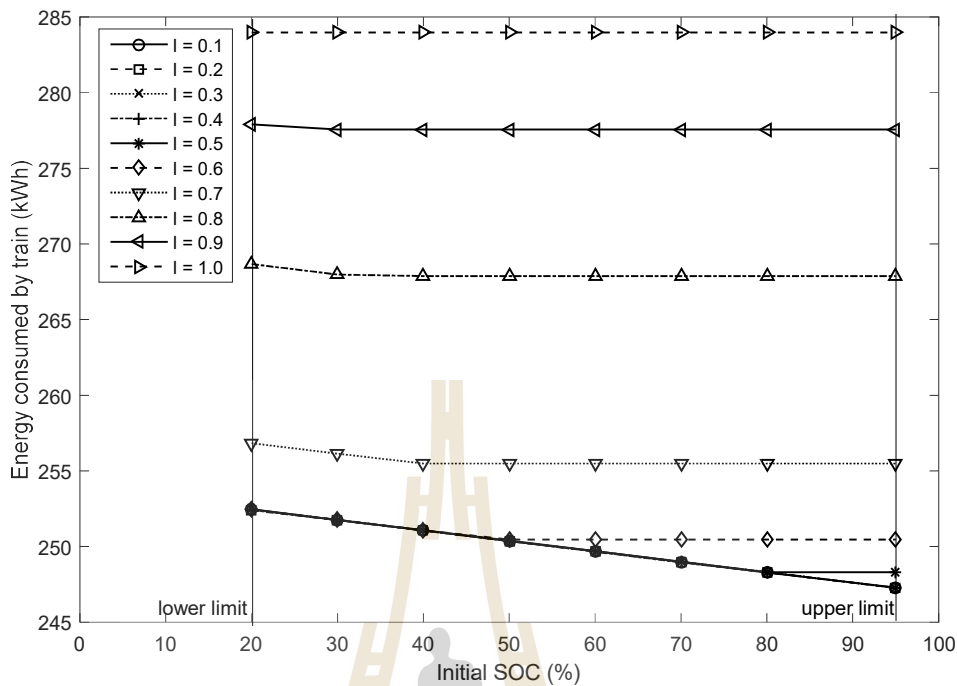
1) ผลการทดสอบกลยุทธ์ที่ 1 (Peak shaving control strategy)



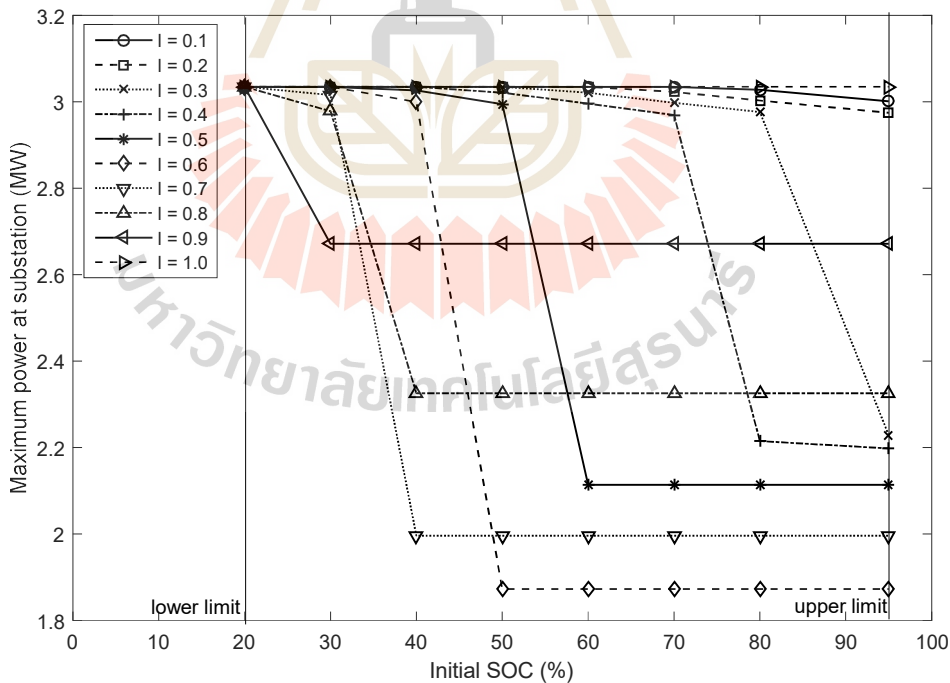
รูปที่ ก.1 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



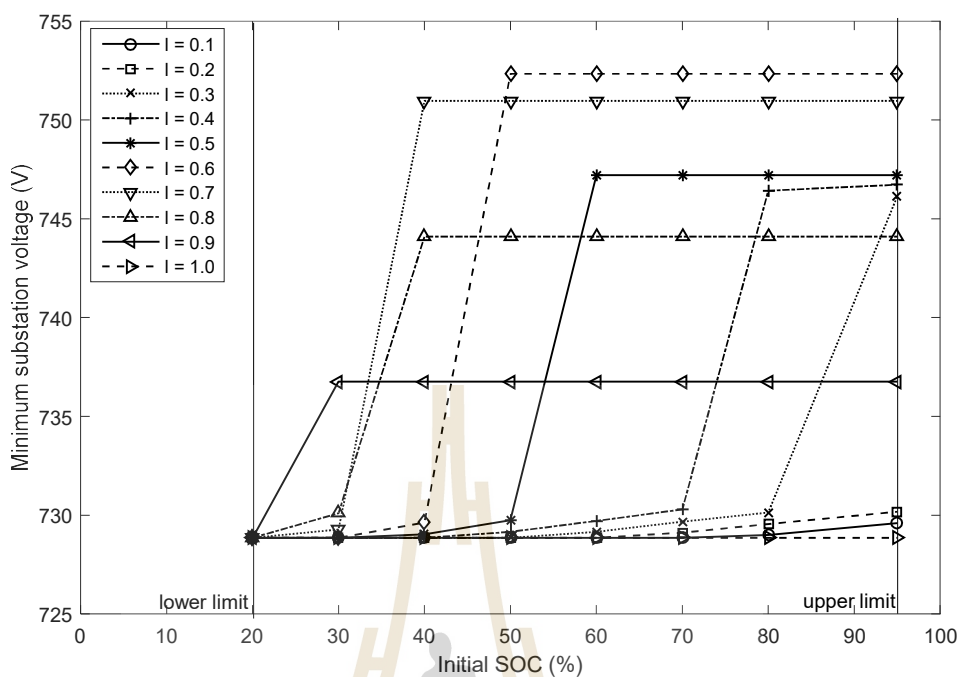
รูปที่ ก.2 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



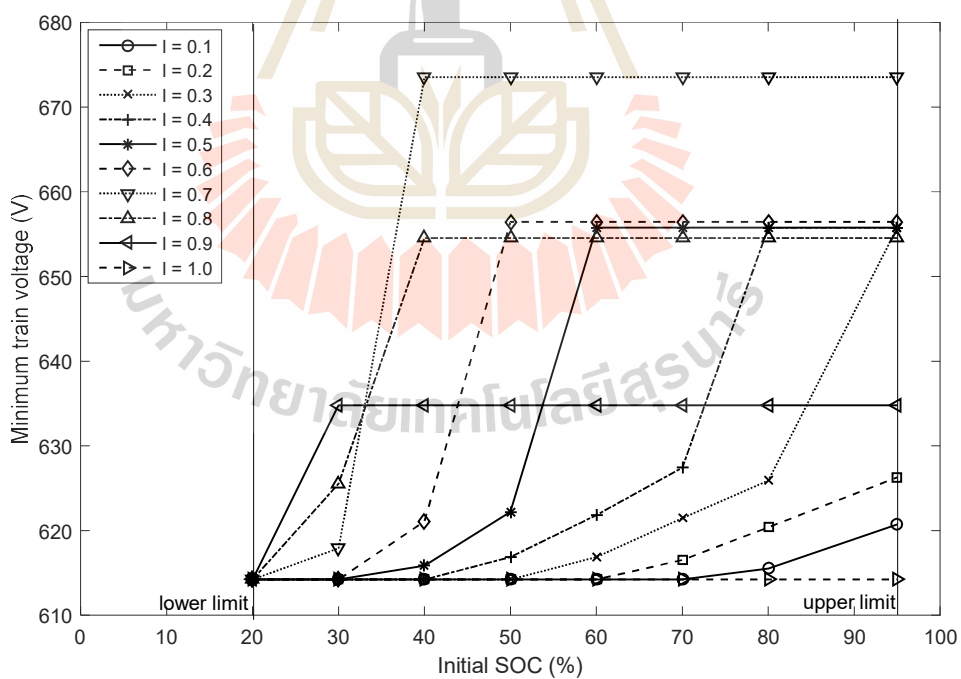
รูปที่ ก.3 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



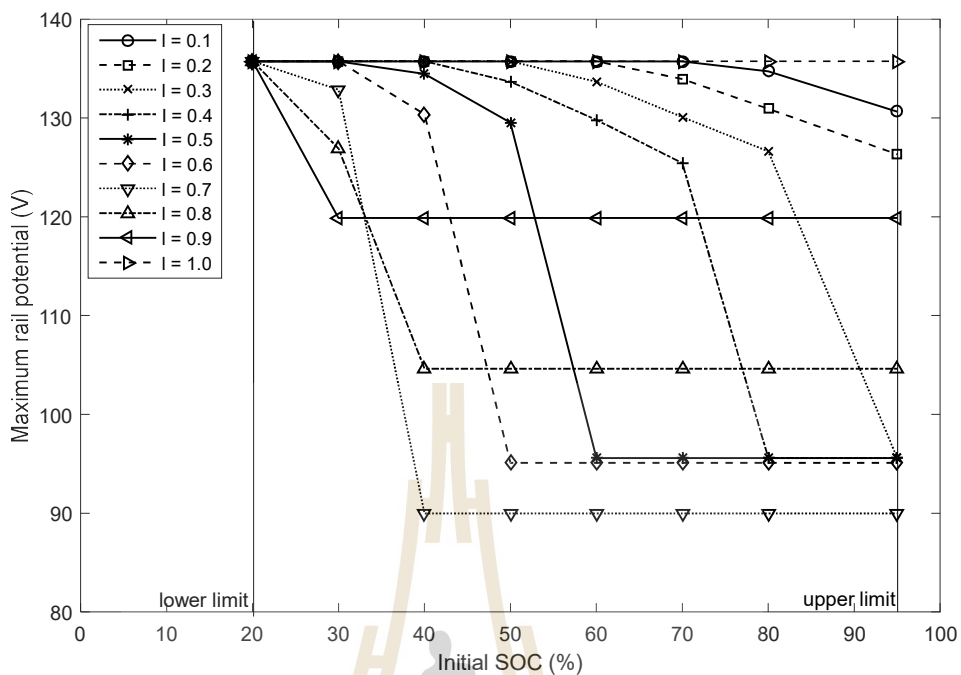
รูปที่ ก.4 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



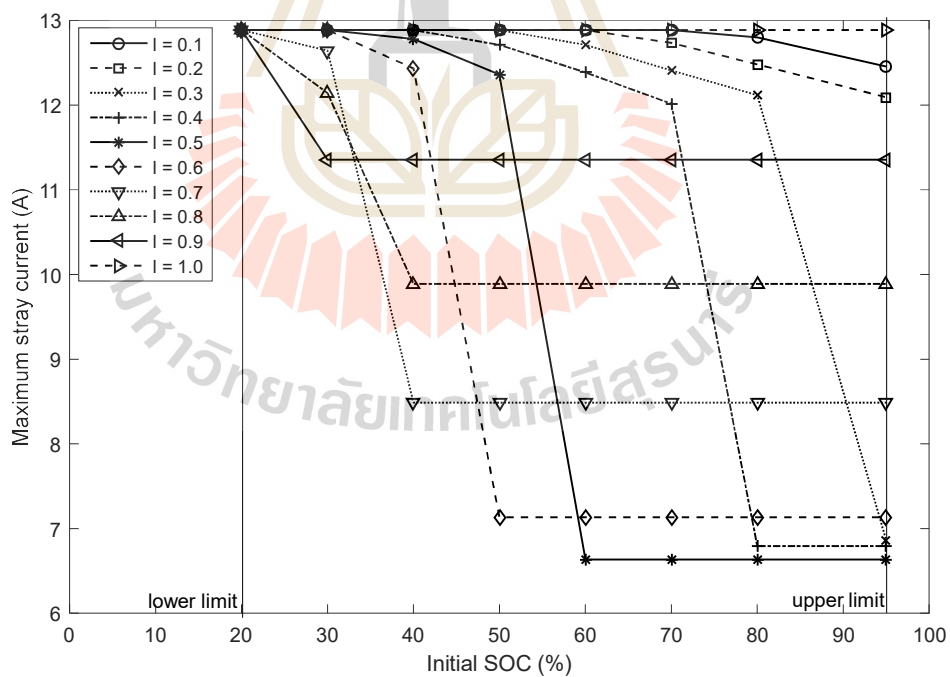
รูปที่ ก.5 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



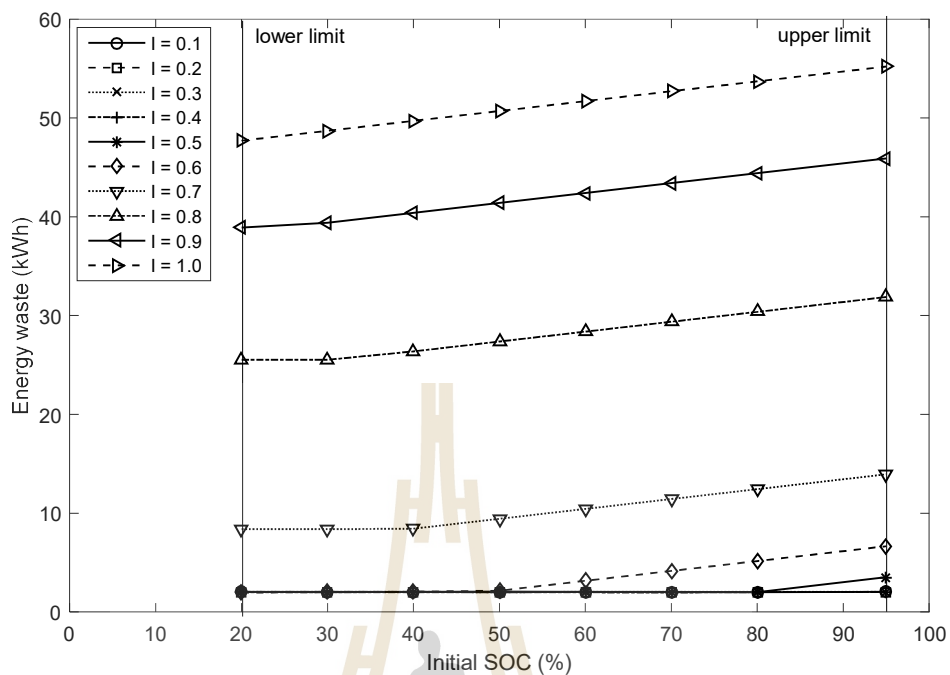
รูปที่ ก.6 ผลของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



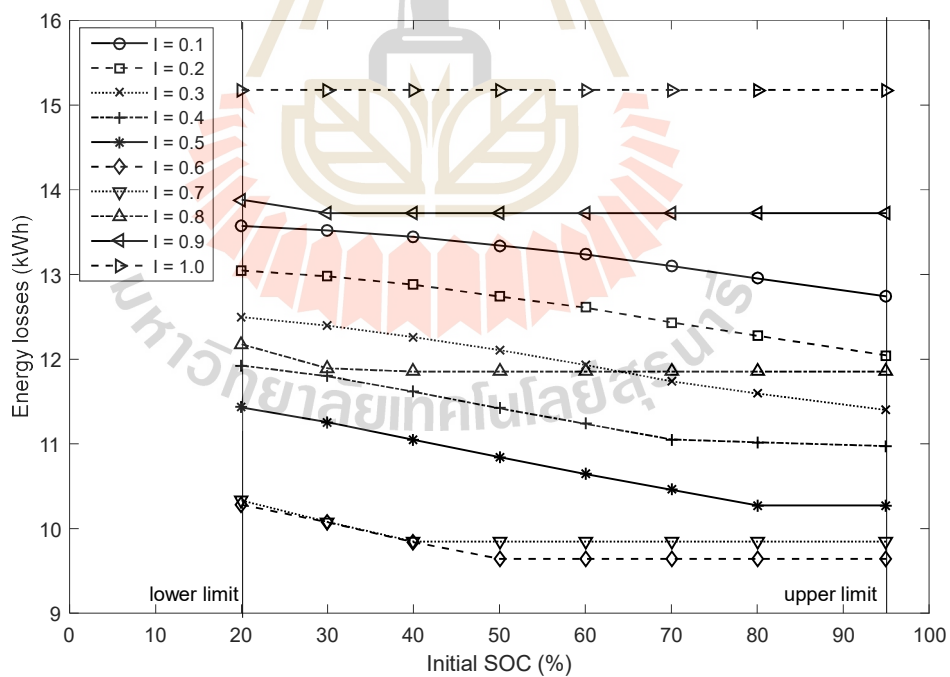
รูปที่ ก.7 ผลของแรงดันรางสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



รูปที่ ก.8 ผลของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



รูปที่ ก.9 ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1



รูปที่ ก.10 ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 1

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน

SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
20	0.1	284.5747	271.6258	12.94887	70.20993	29.80807	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.2	270.3028	259.2699	11.03286	70.20993	11.91371	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.3	263.088	252.4541	10.63388	70.20993	2.042644	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.4	263.7779	252.4229	11.35504	70.20993	1.997432	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.5	264.457	252.4407	12.01633	70.20993	2.023249	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.6	264.9032	252.4231	12.48012	70.20993	1.997748	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.7	265.2701	252.449	12.82108	70.20993	2.035307	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.8	265.5847	252.4665	13.11823	70.20993	2.060626	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.9	265.7729	252.4182	13.35463	70.20993	1.990746	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	266.0151	252.4349	13.58013	70.20993	2.01493	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
30	0.1	283.6672	270.9566	12.71059	70.20993	29.83889	2.573627	2.695139	635.4612	736.2443	119.3288	11.32857	95	1538.7
	0.2	269.4277	258.5674	10.86029	70.20993	11.89622	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.3	262.2841	251.7698	10.51428	70.20993	2.051665	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.4	263.0202	251.7561	11.26408	70.20993	2.031811	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.5	263.6968	251.7584	11.93842	70.20993	2.03511	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.6	264.1575	251.7572	12.40029	70.20993	2.033369	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.7	264.5127	251.7555	12.75725	70.20993	2.030862	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.8	264.8239	251.766	13.05792	70.20993	2.046118	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน (ต่อ)

SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_r (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.9	264.9913	251.6881	13.30318	70.20993	1.933308	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	265.2781	251.7478	13.53031	70.20993	2.019802	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
40	0.1	283.6672	270.9566	12.71059	70.20993	30.83889	2.573627	2.695139	635.4612	736.2443	119.3288	11.32857	95	1538.7
	0.2	268.5291	257.9315	10.59761	70.20993	11.97535	2.430481	2.376491	654.9775	743.0329	104.2591	9.897921	95	1538.7
	0.3	261.3523	251.0837	10.26855	70.20993	2.058026	2.827155	3.017514	617.5614	729.236	133.1269	12.66607	95	1538.7
	0.4	262.106	251.0461	11.05987	70.20993	2.003544	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.5	262.8461	251.0635	11.78258	70.20993	2.028801	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.6	263.3277	251.0527	12.27498	70.20993	2.013084	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.7	263.7122	251.0686	12.64354	70.20993	2.0362	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.8	263.993	251.0408	12.95218	70.20993	1.995901	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.9	264.2185	250.999	13.21951	70.20993	1.935385	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	264.5203	251.0645	13.45579	70.20993	2.030265	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
50	0.1	283.6672	270.9566	12.71059	70.20993	31.83889	2.573627	2.695139	635.4612	736.2443	119.3288	11.32857	95	1538.7
	0.2	268.5291	257.9315	10.59761	70.20993	12.97535	2.430481	2.376491	654.9775	743.0329	104.2591	9.897921	95	1538.7
	0.3	260.3978	250.3829	10.01492	70.20993	2.042999	2.813874	2.074512	655.7529	749.3465	95.58558	8.5674	95	1538.7
	0.4	261.1953	250.3686	10.82669	70.20993	2.022317	2.825268	3.003145	620.3813	729.5515	130.9284	12.48045	95	1538.7
	0.5	261.9338	250.3616	11.57212	70.20993	2.012286	2.828776	3.02827	615.5134	728.9996	134.7227	12.80085	95	1538.7
	0.6	262.4547	250.3559	12.09882	70.20993	2.003979	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน (ต่อ)

SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_r (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.7	262.8584	250.3701	12.48827	70.20993	2.02458	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.8	263.1823	250.3558	12.82658	70.20993	2.003755	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.9	263.45	250.3308	13.11915	70.20993	1.967627	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	263.7197	250.3536	13.36609	70.20993	2.000662	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
60	0.1	283.6672	270.9566	12.71059	70.20993	32.83889	2.573627	2.695139	635.4612	736.2443	119.3288	11.32857	95	1538.7
	0.2	268.5291	257.9315	10.59761	70.20993	13.97535	2.430481	2.376491	654.9775	743.0329	104.2591	9.897921	95	1538.7
	0.3	259.498	249.7046	9.793371	70.20993	2.060737	2.813263	2.074512	655.7576	749.3465	95.58396	8.5674	95	1538.7
	0.4	260.2796	249.6609	10.6187	70.20993	1.997472	2.822347	2.217549	655.7529	746.3701	95.58558	7.318541	95	1538.7
	0.5	260.9953	249.6534	11.34188	70.20993	1.986593	2.827497	2.994254	622.1867	729.7466	129.5201	12.3616	95	1538.7
	0.6	261.5723	249.6778	11.8945	70.20993	2.021892	2.829585	3.017514	617.5614	729.236	133.1269	12.66607	95	1538.7
	0.7	261.9737	249.6678	12.30595	70.20993	2.007409	2.829585	3.033256	614.5362	728.89	135.4841	12.86497	95	1538.7
	0.8	262.3847	249.7031	12.6816	70.20993	2.058498	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.9	262.6265	249.6383	12.98822	70.20993	1.964672	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	262.9212	249.6749	13.24632	70.20993	2.017647	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
70	0.1	283.6672	270.9566	12.71059	70.20993	33.83889	2.573627	2.695139	635.4612	736.2443	119.3288	11.32857	95	1538.7
	0.2	268.5291	257.9315	10.59761	70.20993	14.97535	2.430481	2.376491	654.9775	743.0329	104.2591	9.897921	95	1538.7
	0.3	258.5725	249.001	9.571492	70.20993	2.041684	2.651686	2.074512	665.6357	749.3465	90.24419	8.5674	95	1538.7
	0.4	259.5652	248.9811	10.5841	70.20993	2.01287	2.821423	2.198956	655.7529	746.7584	95.58558	7.318541	95	1538.7

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน (ต่อ)

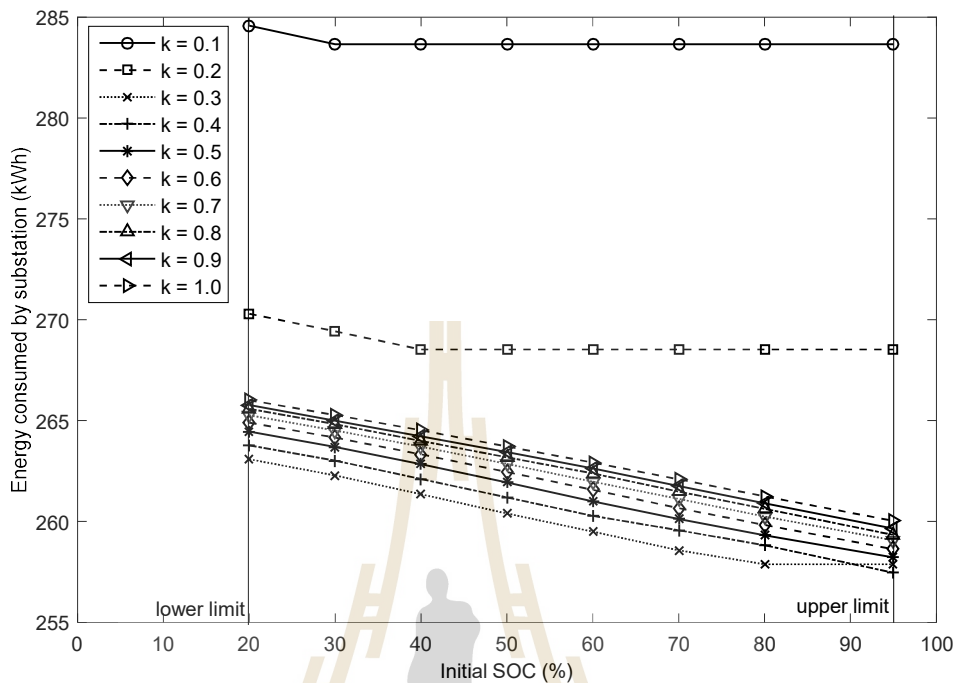
SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_r (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.5	260.1238	248.9779	11.14592	70.20993	2.008276	2.827497	2.228918	640.9037	746.1324	105.8674	6.778941	95	1538.7
	0.6	260.6619	248.9685	11.69336	70.20993	1.994728	2.829585	2.988934	623.2863	729.8632	128.662	12.28918	95	1538.7
	0.7	261.1231	248.9972	12.12591	70.20993	2.036176	2.829585	3.008506	619.3141	729.4338	131.7605	12.5507	95	1538.7
	0.8	261.4828	248.98	12.50282	70.20993	2.011315	2.829585	3.024819	616.1812	729.0755	134.2024	12.75696	95	1538.7
	0.9	261.7573	248.9261	12.83125	70.20993	1.93323	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	262.0936	248.9826	13.11103	70.20993	2.015065	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
80	0.1	283.6672	270.9566	12.71059	70.20993	34.83889	2.573627	2.695139	635.4612	736.2443	119.3288	11.32857	95	1538.7
	0.2	268.5291	257.9315	10.59761	70.20993	15.97535	2.430481	2.376491	654.9775	743.0329	104.2591	9.897921	95	1538.7
	0.3	257.8821	248.4623	9.419803	70.20993	2.261542	2.507092	2.074512	673.1278	749.3465	90.24419	8.5674	95	1538.7
	0.4	258.8228	248.3064	10.51637	70.20993	2.035798	2.82052	2.002866	655.7529	749.5733	95.58558	7.318541	95	1538.7
	0.5	259.3154	248.2967	11.01876	70.20993	2.021689	2.827497	2.228918	655.7529	746.1324	95.58558	6.735245	95	1538.7
	0.6	259.8306	248.2839	11.54664	70.20993	2.003216	2.829585	2.542263	640.9037	739.5179	105.8674	6.820609	95	1538.7
	0.7	260.2465	248.3017	11.94474	70.20993	2.029024	2.829585	2.983618	624.3985	729.9798	127.794	12.21592	95	1538.7
	0.8	260.6325	248.2982	12.33433	70.20993	2.023875	2.829585	3.003145	620.3813	729.5515	130.9284	12.48045	95	1538.7
	0.9	260.8959	248.2308	12.66503	70.20993	1.926356	2.829585	3.017514	617.5614	729.236	133.1269	12.66607	95	1538.7
	1	261.2466	248.2781	12.9685	70.20993	1.994791	2.829585	3.02827	615.5134	728.9996	134.7227	12.80085	95	1538.7
95	0.1	283.6672	270.9566	12.71059	70.20993	36.33889	2.573627	2.695139	635.4612	736.2443	119.3288	11.32857	95	1538.7
	0.2	268.5291	257.9315	10.59761	70.20993	17.47535	2.430481	2.376491	654.9775	743.0329	104.2591	9.897921	95	1538.7

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมแบบสัดส่วน (ต่อ)

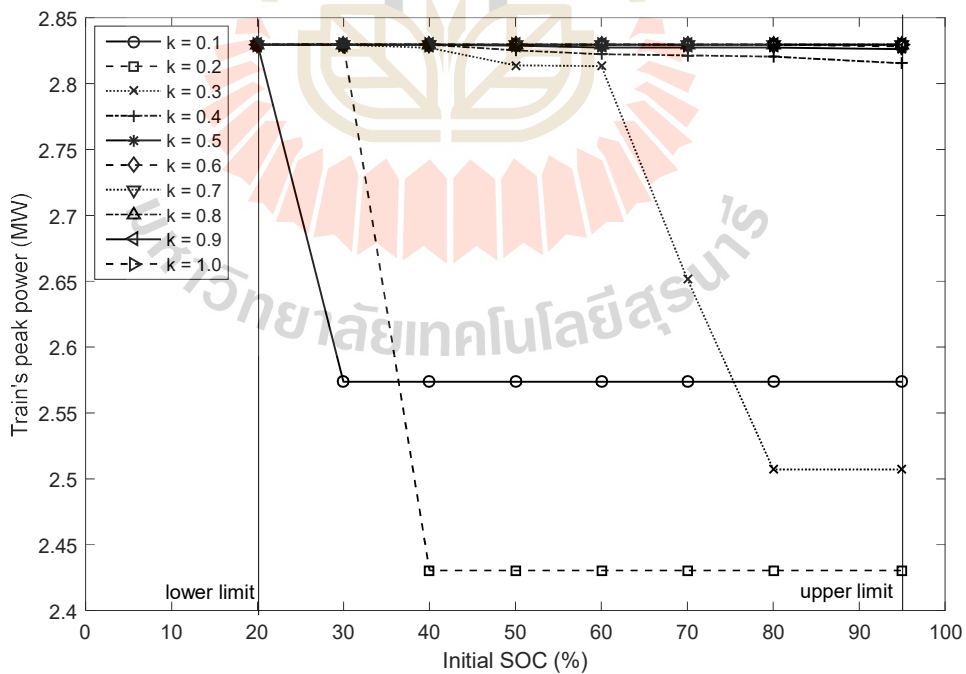
SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.3	257.8821	248.4623	9.419803	70.20993	3.761542	2.507092	2.074512	673.1278	749.3465	90.24419	8.5674	95	1538.7
	0.4	257.4632	247.2591	10.20413	70.20993	2.018993	2.815439	2.002866	655.7529	749.5733	95.58558	7.318541	95	1538.7
	0.5	258.2279	247.2463	10.98157	70.20993	2.000475	2.826152	2.218336	655.7529	746.3537	95.58558	6.735245	95	1538.7
	0.6	258.6272	247.2542	11.37306	70.20993	2.011907	2.828164	2.228918	655.7529	746.1324	95.58558	6.820609	95	1538.7
	0.7	259.0681	247.2615	11.80662	70.20993	2.022505	2.829585	2.542263	640.9037	739.5179	105.8674	6.871842	95	1538.7
	0.8	259.3334	247.2484	12.08507	70.20993	2.003468	2.829585	2.971207	627.0422	730.2517	125.7296	12.0416	95	1538.7
	0.9	259.642	247.2006	12.44145	70.20993	1.934248	2.829585	2.988934	623.2863	729.8632	128.662	12.28918	95	1538.7
	1	260.0323	247.2676	12.76471	70.20993	2.031329	2.829585	3.003145	620.3813	729.5515	130.9284	12.48045	95	1538.7



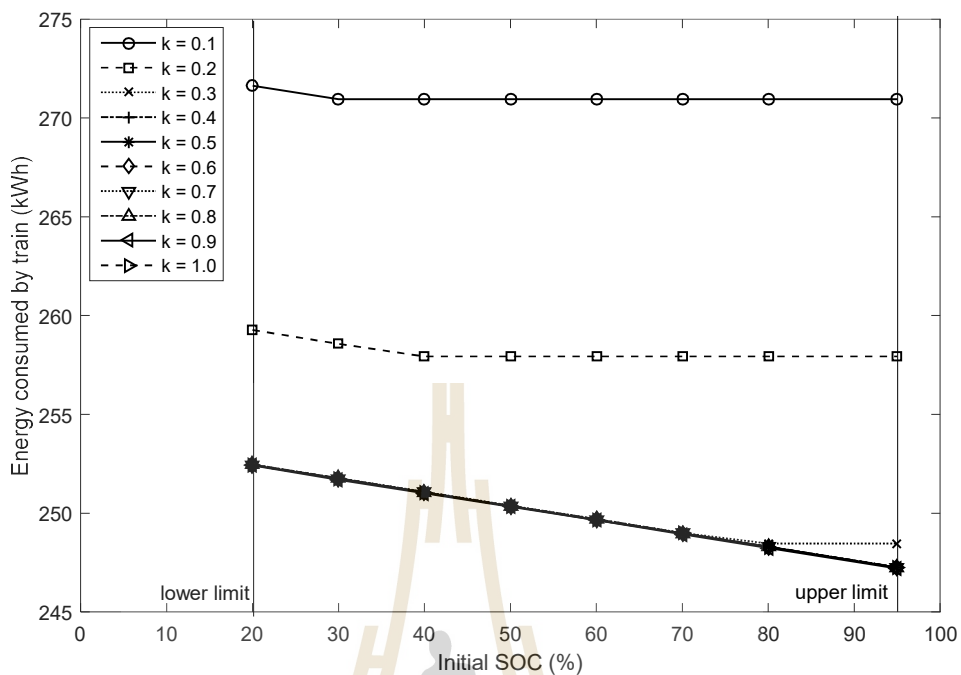
2) ผลการทดสอบกลยุทธ์ที่ 2 (Proportional control strategy)



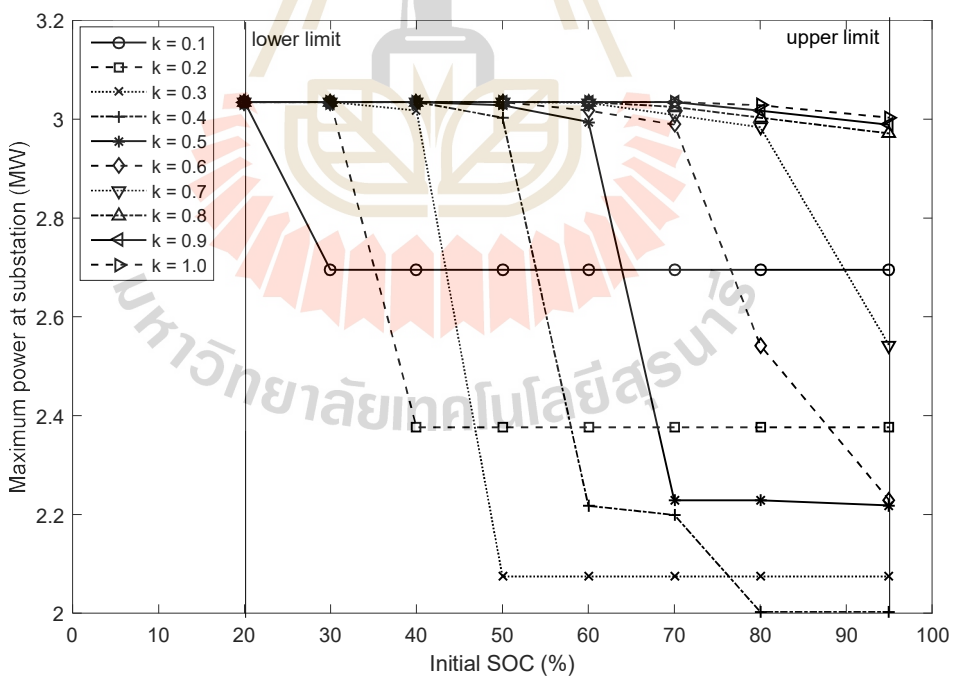
รูปที่ ก.11 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกลยุทธ์ที่ 2



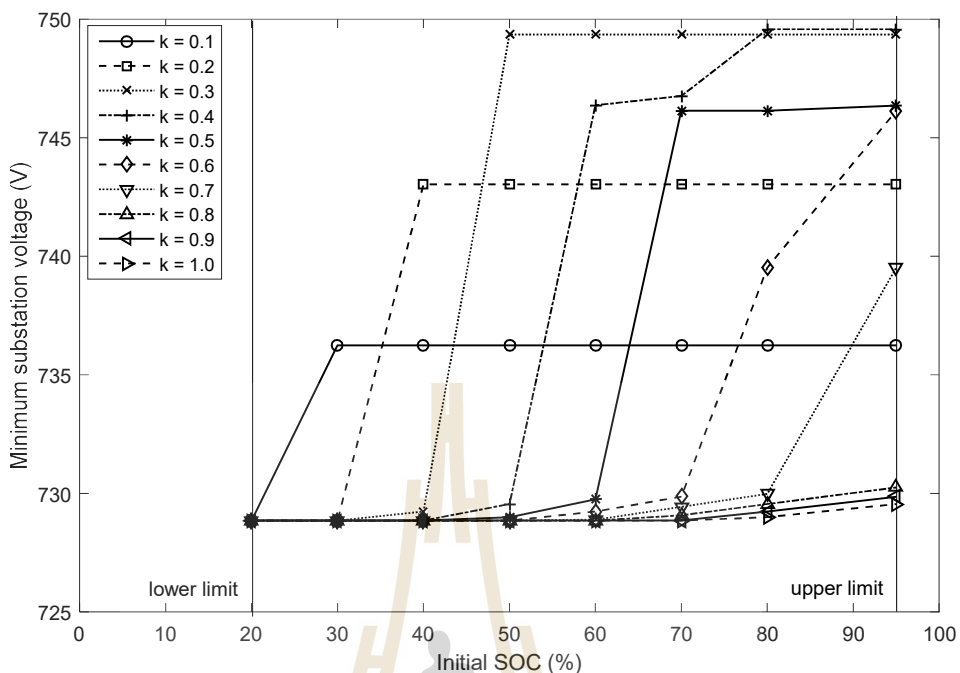
รูปที่ ก.12 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2



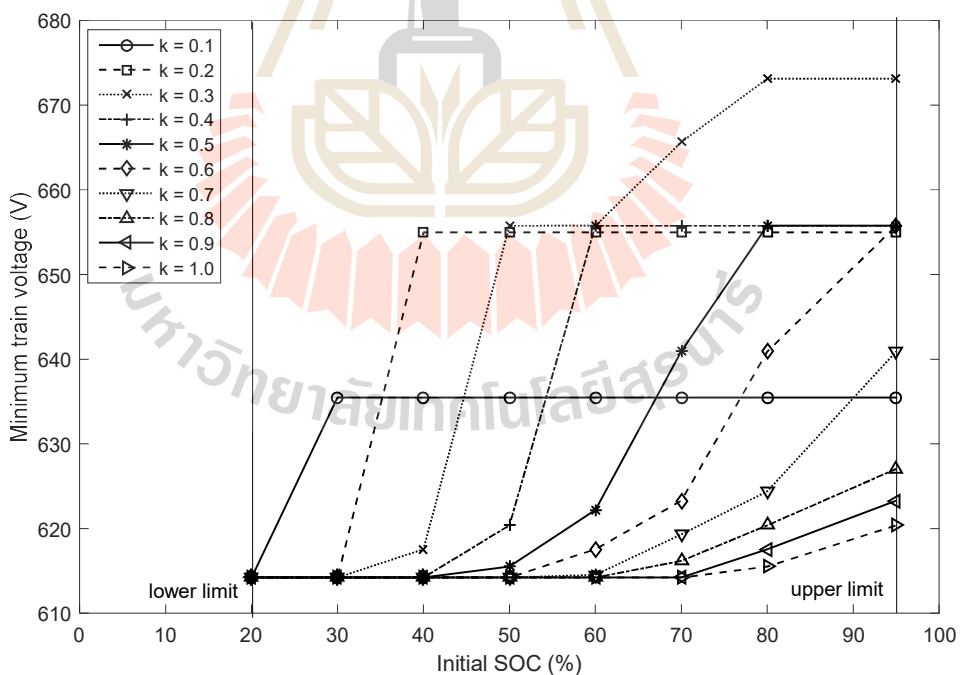
รูปที่ ก.13 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2



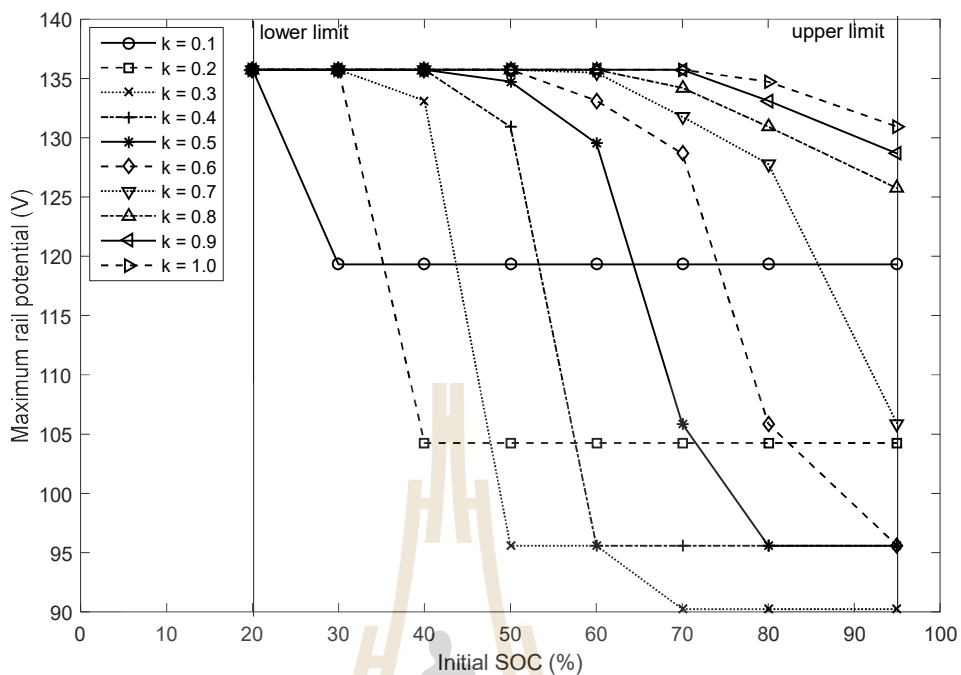
รูปที่ ก.14 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2



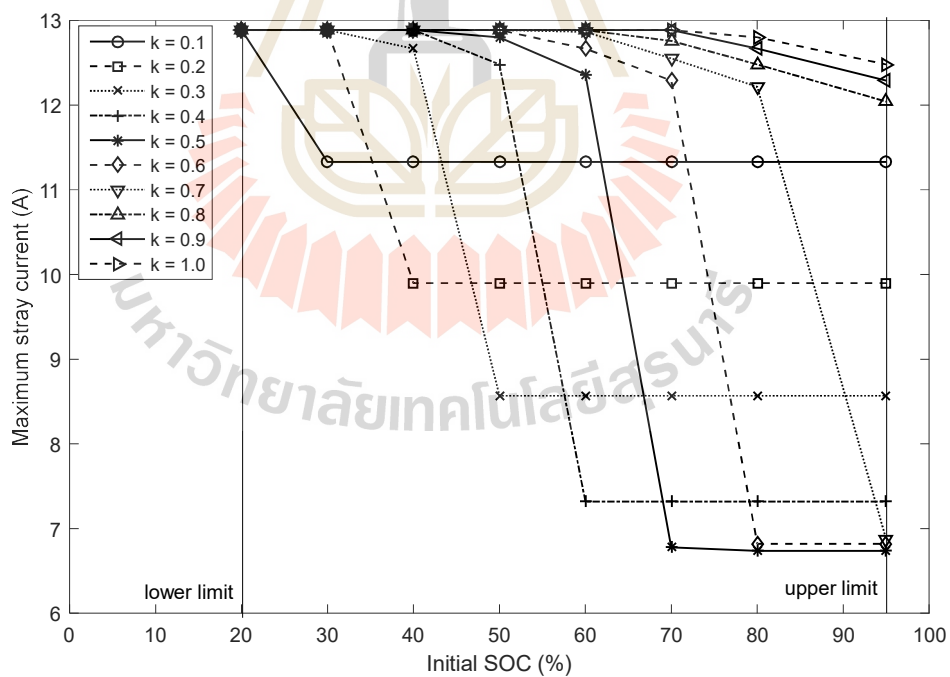
รูปที่ ก.15 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2



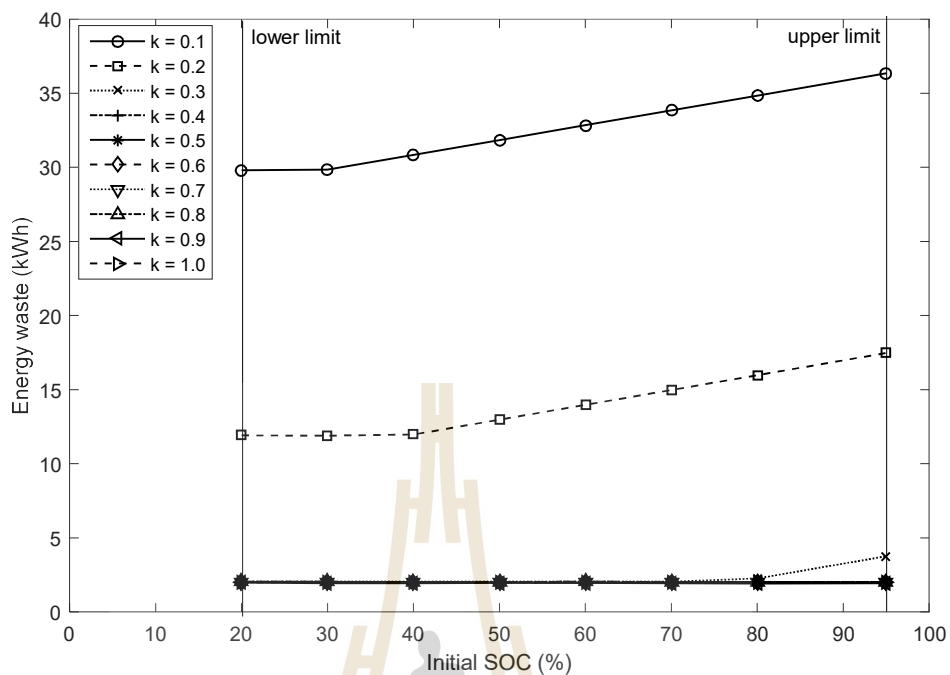
รูปที่ ก.16 ผลของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2



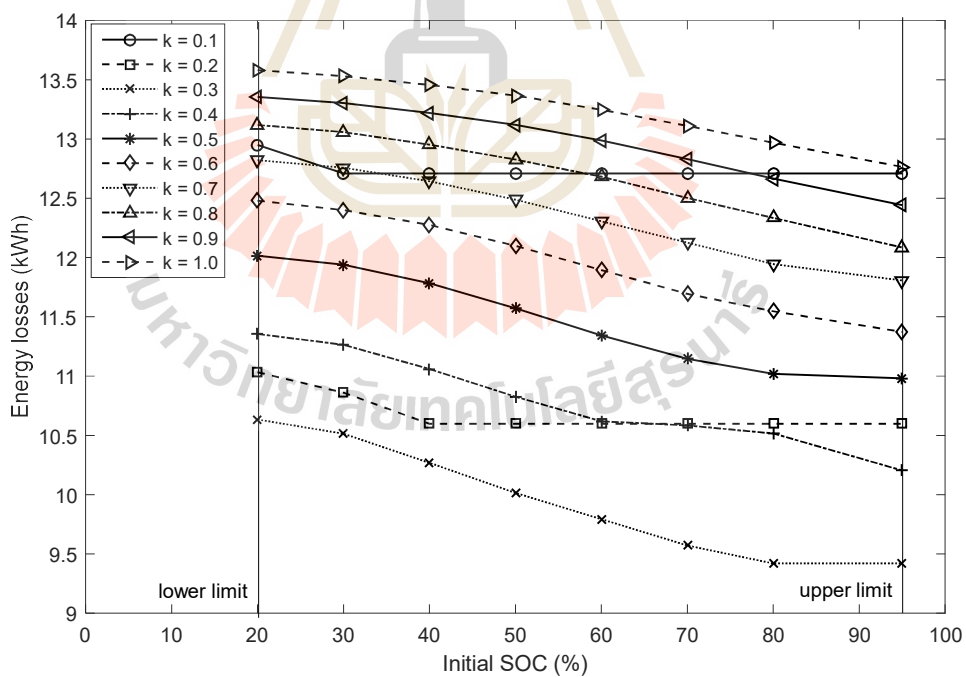
รูปที่ ก.17 ผลของแรงดันรางสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2



รูปที่ ก.18 ผลของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2



รูปที่ ก.19 ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2



รูปที่ ก.20 ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 2

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ

SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_r (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
20	0.1	287.693	273.7285	13.96443	70.20993	32.85332	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.2	281.0875	267.5928	13.4947	70.20993	23.9673	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.3	277.3126	263.9494	13.36322	70.20993	18.69071	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.4	274.7547	261.4439	13.31084	70.20993	15.06213	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.5	272.9281	259.6309	13.29721	70.20993	12.43648	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.6	271.688	258.3666	13.32133	70.20993	10.60549	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.7	270.7259	257.3771	13.34878	70.20993	9.172367	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.8	269.9974	256.6149	13.38257	70.20993	8.068489	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.9	269.4376	256.0044	13.43325	70.20993	7.184397	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	268.989	255.4932	13.49573	70.20993	6.444089	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
30	0.1	287.2295	273.3214	13.90805	70.20993	33.26377	2.824313	3.000172	616.4081	729.6167	134.0409	12.72528	95	1538.7
	0.2	280.3498	266.9471	13.40268	70.20993	24.03211	2.825478	3.005947	617.2926	729.49	133.3579	12.66044	95	1538.7
	0.3	276.5374	263.2709	13.26652	70.20993	18.70811	2.826891	3.015703	617.1559	729.2758	133.4635	12.67046	95	1538.7
	0.4	273.9669	260.755	13.21193	70.20993	15.06445	2.828312	3.024819	616.0323	729.0755	134.3197	12.76532	95	1538.7
	0.5	272.1583	258.9404	13.21795	70.20993	12.43641	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.6	270.9343	257.676	13.25828	70.20993	10.60534	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.7	269.9819	256.6865	13.29547	70.20993	9.172206	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	0.8	269.2602	255.9243	13.33595	70.20993	8.068325	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ (ต่อ)

SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_r (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.9	268.705	255.3138	13.39122	70.20993	7.184199	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	268.2628	254.8031	13.45969	70.20993	6.444661	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
40	0.1	286.8578	272.996	13.86177	70.20993	33.79248	2.813451	2.964386	618.6628	730.401	132.2999	12.55999	95	1538.7
	0.2	279.6467	266.3294	13.31724	70.20993	24.13761	2.822404	2.972799	621.215	730.2168	130.3292	12.3729	95	1538.7
	0.3	275.7938	262.6131	13.1807	70.20993	18.75537	2.823493	2.985614	622.3143	729.936	129.4804	12.29782	95	1538.7
	0.4	273.207	260.0807	13.12627	70.20993	15.08789	2.824678	2.997805	621.4528	729.6687	130.0955	12.40942	95	1538.7
	0.5	271.3702	258.258	13.11213	70.20993	12.44822	2.825694	3.006716	619.6188	729.4731	131.5253	12.52829	95	1538.7
	0.6	270.1262	256.989	13.13713	70.20993	10.61039	2.826635	3.013898	618.0359	729.3154	132.7579	12.63387	95	1538.7
	0.7	269.1634	255.9972	13.16624	70.20993	9.173987	2.827713	3.021153	616.8384	729.156	133.6926	12.71166	95	1538.7
	0.8	268.4361	255.234	13.20215	70.20993	8.068639	2.828583	3.026601	615.7222	729.0363	134.5615	12.78553	95	1538.7
	0.9	267.9002	254.6234	13.27677	70.20993	7.184386	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
	1	267.4702	254.1127	13.35751	70.20993	6.444755	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
50	0.1	286.5407	272.7207	13.81996	70.20993	34.39375	2.7883	2.928875	620.8951	731.1775	130.5762	12.39635	95	1538.7
	0.2	278.9385	265.7102	13.22834	70.20993	24.24075	2.784796	2.920772	625.0706	731.3545	127.3521	12.09027	95	1538.7
	0.3	275.0422	261.9543	13.08791	70.20993	18.80137	2.813301	2.943385	627.3893	730.8605	125.551	11.94222	95	1538.7
	0.4	272.4384	259.406	13.03244	70.20993	15.11078	2.822528	2.972982	626.5985	730.2128	126.0838	12.06832	95	1538.7
	0.5	270.5952	257.5771	13.01807	70.20993	12.4621	2.823343	2.983618	624.329	729.9798	127.8509	12.21811	95	1538.7
	0.6	269.3479	256.3046	13.04335	70.20993	10.61913	2.824139	2.99248	622.458	729.7855	129.3107	12.34162	95	1538.7

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ (ต่อ)

SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_r (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.7	268.3837	255.3106	13.07308	70.20993	9.179603	2.824868	2.999804	620.8355	729.6248	130.5749	12.44981	95	1538.7
	0.8	267.6478	254.5417	13.1061	70.20993	8.066104	2.827497	3.006716	619.6558	729.4731	131.4968	12.52737	95	1538.7
	0.9	267.095	253.9345	13.1605	70.20993	7.186689	2.827497	3.012096	618.5112	729.355	132.3884	12.60161	95	1538.7
	1	266.6455	253.4221	13.22337	70.20993	6.444608	2.827497	3.017514	617.5614	729.236	133.1269	12.66607	95	1538.7
60	0.1	286.259	272.4794	13.77954	70.20993	35.04432	2.763149	2.893955	623.1055	731.9393	128.8694	12.23432	95	1538.7
	0.2	278.2328	265.0914	13.14148	70.20993	24.34457	2.746538	2.866435	628.8722	732.5385	124.4166	11.81158	95	1538.7
	0.3	274.2919	261.2961	12.9958	70.20993	18.84812	2.813293	2.873135	632.2722	732.3927	121.7677	11.60594	95	1538.7
	0.4	271.6667	258.7314	12.93535	70.20993	15.13371	2.814718	2.900793	631.5089	731.7903	122.2798	11.7145	95	1538.7
	0.5	269.8143	256.8961	12.91821	70.20993	12.47578	2.817297	2.941779	629.0728	730.8956	124.1593	11.89456	95	1538.7
	0.6	268.5632	255.6201	12.94317	70.20993	10.6278	2.822528	2.972982	626.6603	730.2128	126.0279	12.06679	95	1538.7
	0.7	267.597	254.624	12.97301	70.20993	9.185214	2.82361	2.981846	624.7719	730.0186	127.5024	12.1913	95	1538.7
	0.8	266.8538	253.853	13.00073	70.20993	8.068686	2.827497	2.988934	623.2863	729.8632	128.662	12.28918	95	1538.7
	0.9	266.3033	253.2423	13.06097	70.20993	7.184225	2.827497	2.994254	622.1079	729.7466	129.5839	12.36456	95	1538.7
	1	265.8384	252.7314	13.10696	70.20993	6.444292	2.827497	2.999584	621.0529	729.6296	130.4071	12.43381	95	1538.7
70	0.1	286.0038	272.2601	13.7437	70.20993	35.72676	2.739768	2.860643	625.2947	732.6645	127.179	12.07384	95	1538.7
	0.2	277.5403	264.4819	13.05847	70.20993	24.46186	2.740471	2.812305	632.6358	733.7139	121.5105	11.53569	95	1538.7
	0.3	273.5455	260.6389	12.90665	70.20993	18.89625	2.813287	2.80287	636.9204	733.9184	118.1578	11.28691	95	1538.7
	0.4	270.8994	258.0574	12.84194	70.20993	15.15772	2.814652	2.818155	636.4011	733.5871	118.5053	11.3529	95	1538.7

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ (ต่อ)

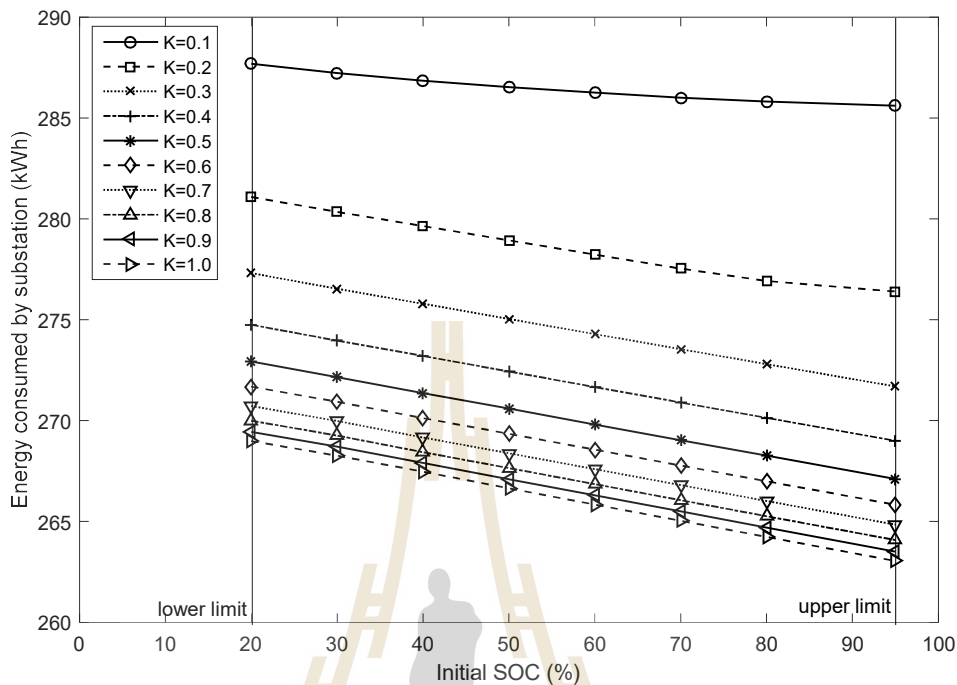
SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.5	269.0353	256.2153	12.82	70.20993	12.48985	2.817297	2.849244	634.5637	732.9123	119.9229	11.48871	95	1538.7
	0.6	267.7763	254.9357	12.84063	70.20993	10.63659	2.820424	2.890426	632.124	732.0162	121.8052	11.66903	95	1538.7
	0.7	266.8059	253.9374	12.86855	70.20993	9.190833	2.82361	2.937921	629.3024	730.9799	123.9822	11.87759	95	1538.7
	0.8	266.057	253.161	12.89602	70.20993	8.06639	2.827497	2.971207	626.9808	730.2517	125.7806	12.04312	95	1538.7
	0.9	265.5054	252.5513	12.95408	70.20993	7.183449	2.827497	2.978302	625.5231	730.0963	126.9159	12.14179	95	1538.7
	1	265.0364	252.041	12.99538	70.20993	6.444476	2.827497	2.983618	624.3985	729.9798	127.794	12.21592	95	1538.7
80	0.1	285.8277	272.1132	13.71456	70.20993	36.51387	2.739768	2.828603	627.4633	733.3605	125.5045	11.91486	95	1538.7
	0.2	276.9241	263.9317	12.99238	70.20993	24.66515	2.740471	2.758384	636.3627	734.8808	118.6327	11.26249	95	1538.7
	0.3	272.803	259.9826	12.82039	70.20993	18.94579	2.81328	2.732618	641.3421	735.4369	114.722	10.98062	95	1538.7
	0.4	270.1367	257.3843	12.75242	70.20993	15.18282	2.814587	2.735002	641.2978	735.3855	114.7274	10.99097	95	1538.7
	0.5	268.2616	255.5351	12.72653	70.20993	12.50473	2.817297	2.755477	640.0945	734.9436	115.6558	11.07991	95	1538.7
	0.6	266.9947	254.2516	12.74307	70.20993	10.64594	2.820175	2.787656	638.2002	734.2478	117.1173	11.21992	95	1538.7
	0.7	266.0178	253.2511	12.76678	70.20993	9.196864	2.823281	2.827368	635.857	733.3873	118.9251	11.39311	95	1538.7
	0.8	265.2627	252.4719	12.79076	70.20993	8.068493	2.827497	2.871928	633.2207	732.419	120.9591	11.58797	95	1538.7
	0.9	264.7046	251.8605	12.84417	70.20993	7.182944	2.827497	2.919444	630.4012	731.3835	123.1344	11.79637	95	1538.7
	1	264.237	251.3496	12.88735	70.20993	6.443097	2.827497	2.968684	627.4701	730.3069	125.3958	12.01302	95	1538.7
95	0.1	285.6164	271.9436	13.67279	70.20993	37.76838	2.739768	2.780887	630.6788	734.3943	123.0216	11.67915	95	1538.7
	0.2	276.4011	263.4836	12.91752	70.20993	25.51616	2.740471	2.677856	641.8879	736.616	114.3664	10.85746	95	1538.7

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบของกลยุทธ์ควบคุมสถานะของการประจุ (ต่อ)

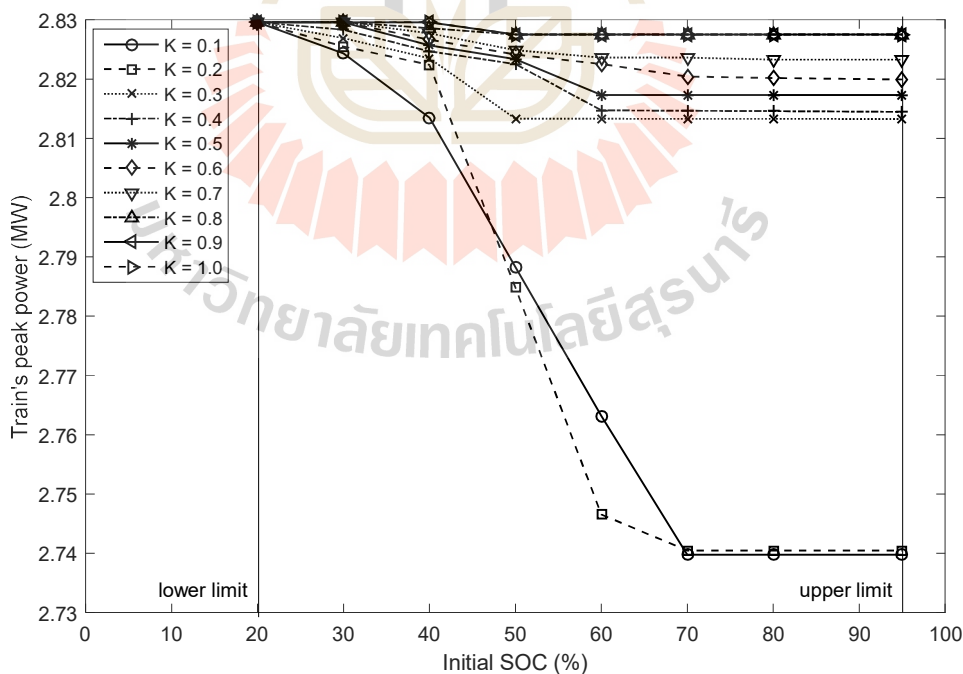
SOC_{start} (%)	K	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
	0.3	271.6962	259.0001	12.69609	70.20993	19.02298	2.813272	2.627191	647.6083	737.7032	109.8587	10.52455	95	1538.7
	0.4	269.0013	256.3761	12.62511	70.20993	15.22277	2.81446	2.609358	648.648	738.085	109.0566	10.4477	95	1538.7
	0.5	267.1108	254.5159	12.59491	70.20993	12.52866	2.817297	2.612589	648.4597	738.0159	109.2018	10.46162	95	1538.7
	0.6	265.8332	253.2265	12.60669	70.20993	10.66134	2.819931	2.629589	647.4684	737.6518	109.9666	10.53489	95	1538.7
	0.7	264.8478	252.2223	12.62551	70.20993	9.206973	2.823281	2.655741	645.9413	737.091	111.1448	10.64776	95	1538.7
	0.8	264.0817	251.4364	12.64528	70.20993	8.068816	2.827497	2.688042	644.0518	736.397	112.6026	10.78742	95	1538.7
	0.9	263.5139	250.8249	12.68902	70.20993	7.183207	2.827497	2.724482	641.9155	735.6124	114.2508	10.94532	95	1538.7
	1	263.0432	250.3137	12.72945	70.20993	6.442875	2.827497	2.763671	639.6125	734.7665	116.0277	11.11554	95	1538.7



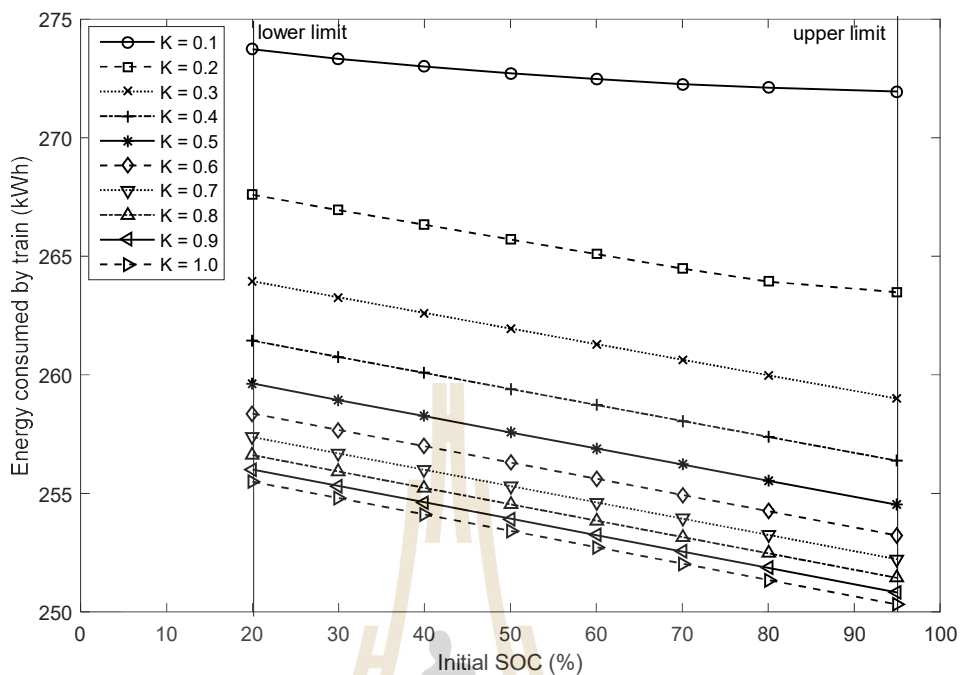
3) ผลการทดสอบกลยุทธ์ที่ 3 (State of Charge control strategy)



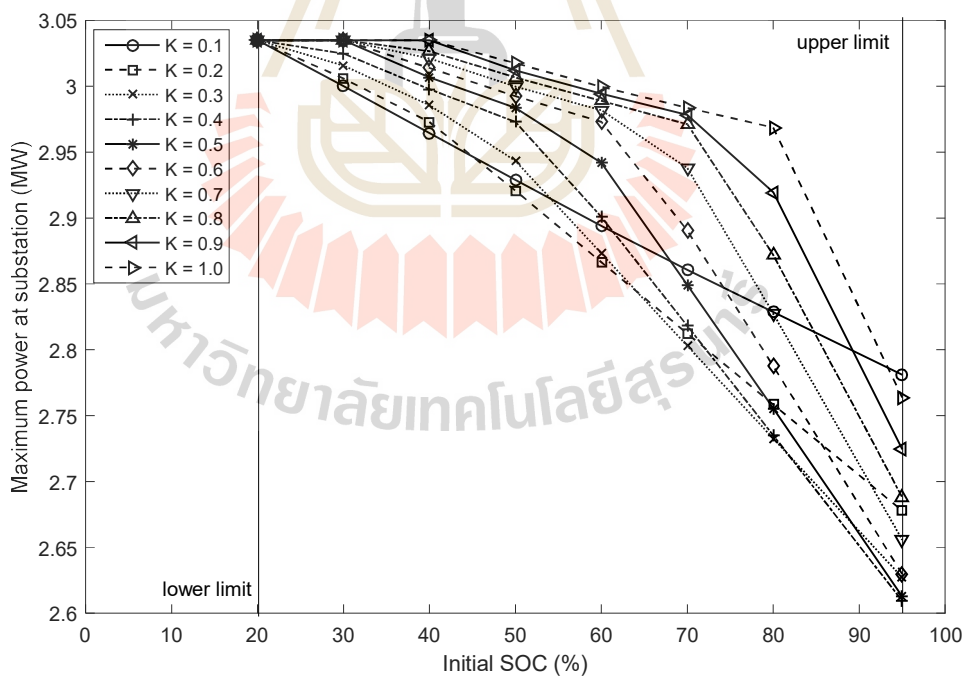
รูปที่ ก.21 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกลยุทธ์ที่ 3



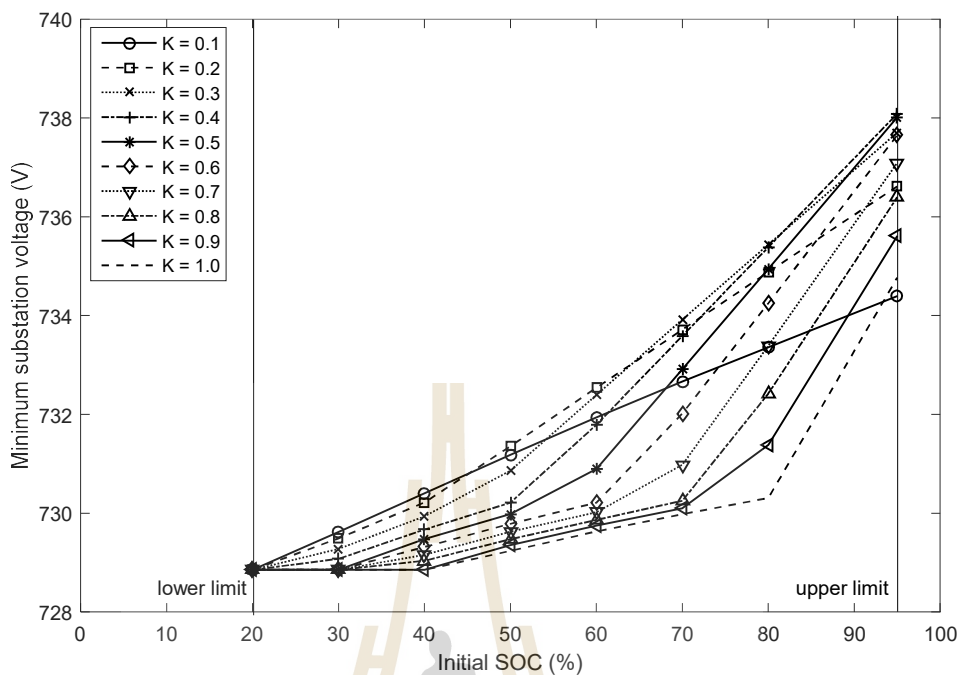
รูปที่ ก.22 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3



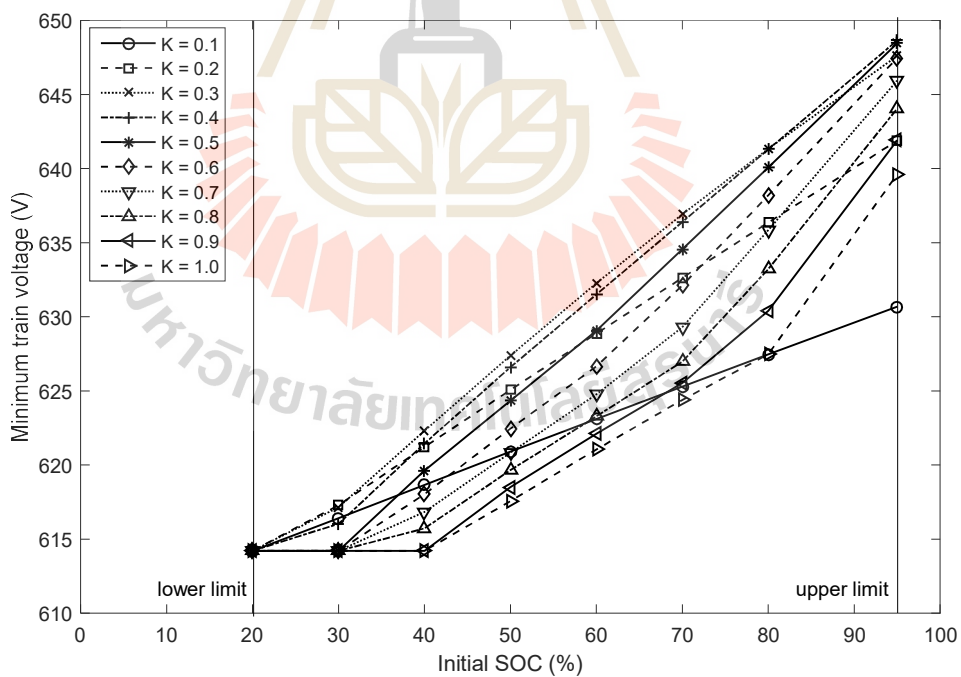
รูปที่ ก.23 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3



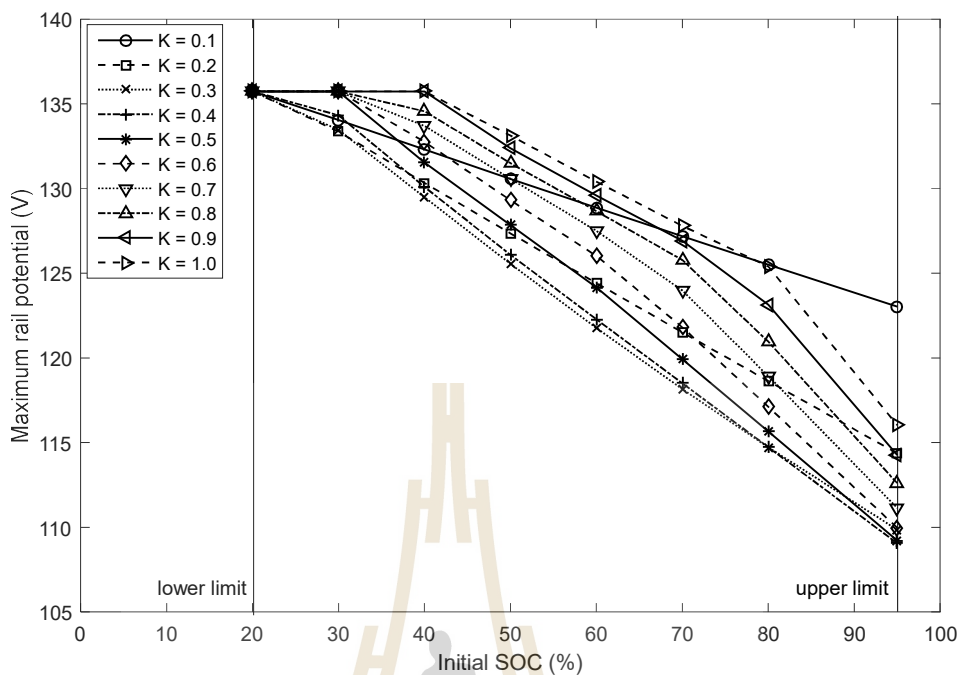
รูปที่ ก.24 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3



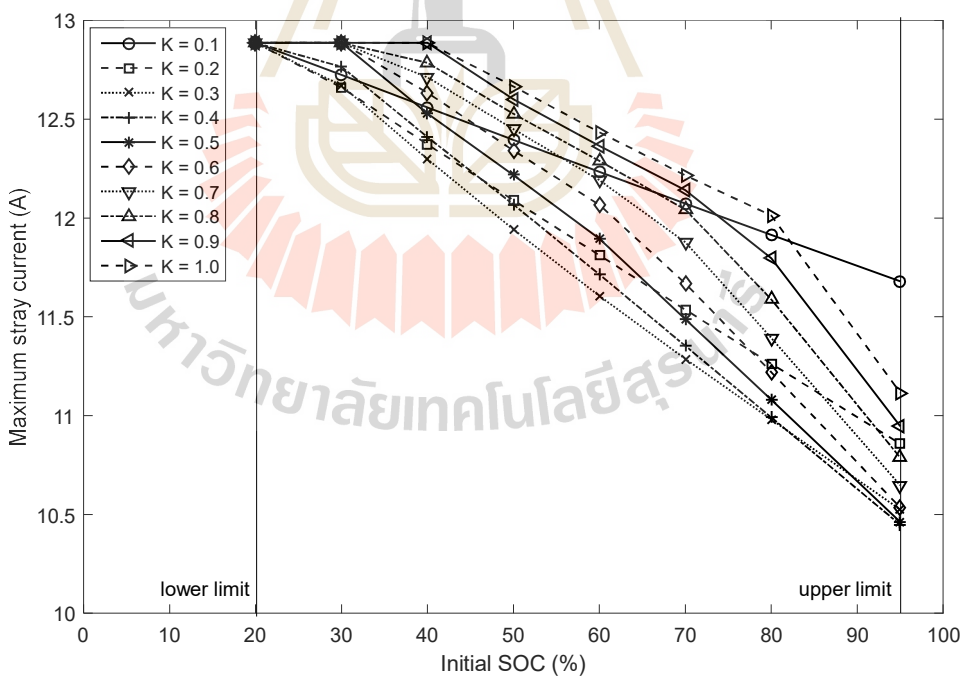
รูปที่ ก.25 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3



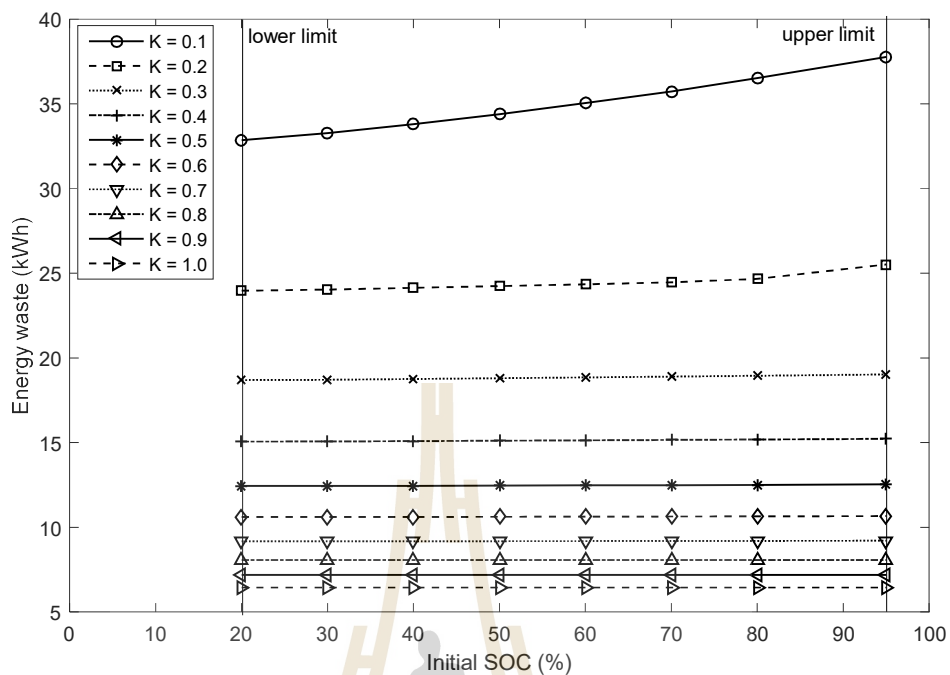
รูปที่ ก.26 ผลของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3



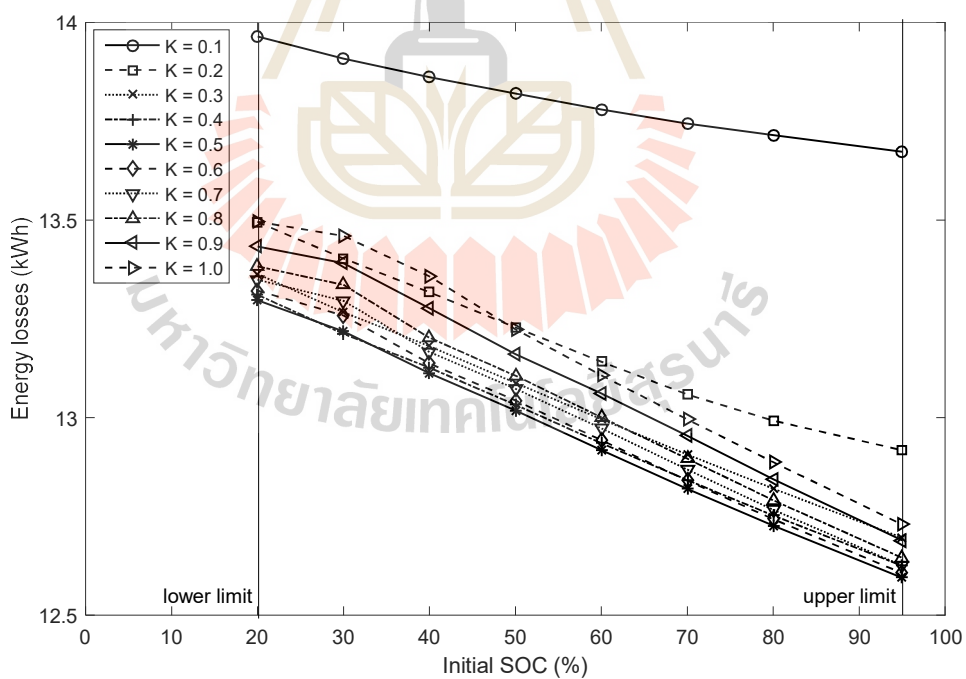
รูปที่ ก.27 ผลของแรงดันรางสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3



รูปที่ ก.28 ผลของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3



รูปที่ ก.29 ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3



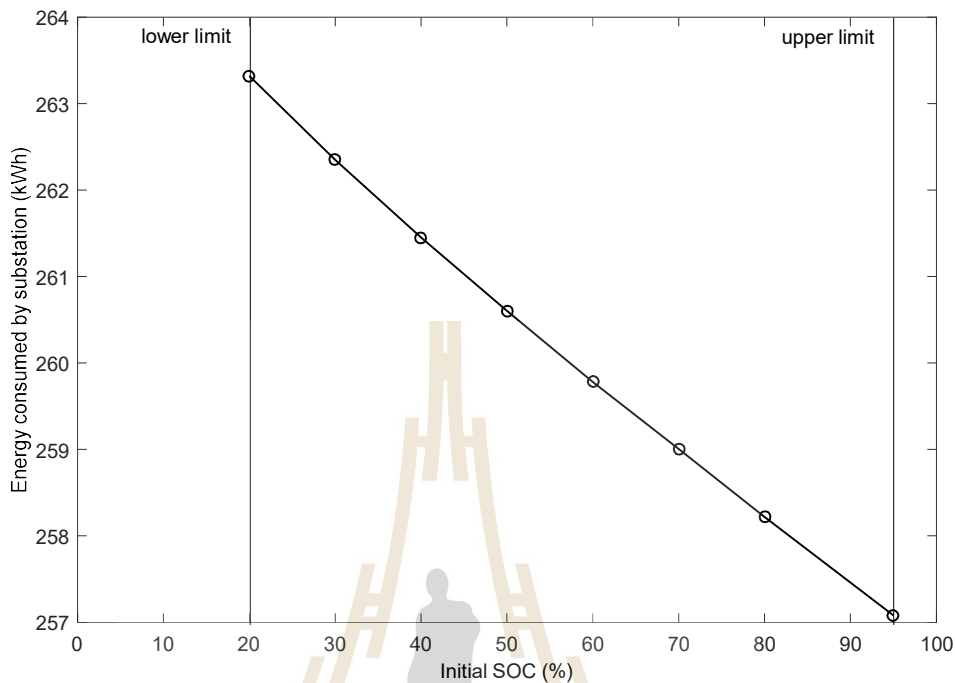
รูปที่ ก.30 ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 3

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบของกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด

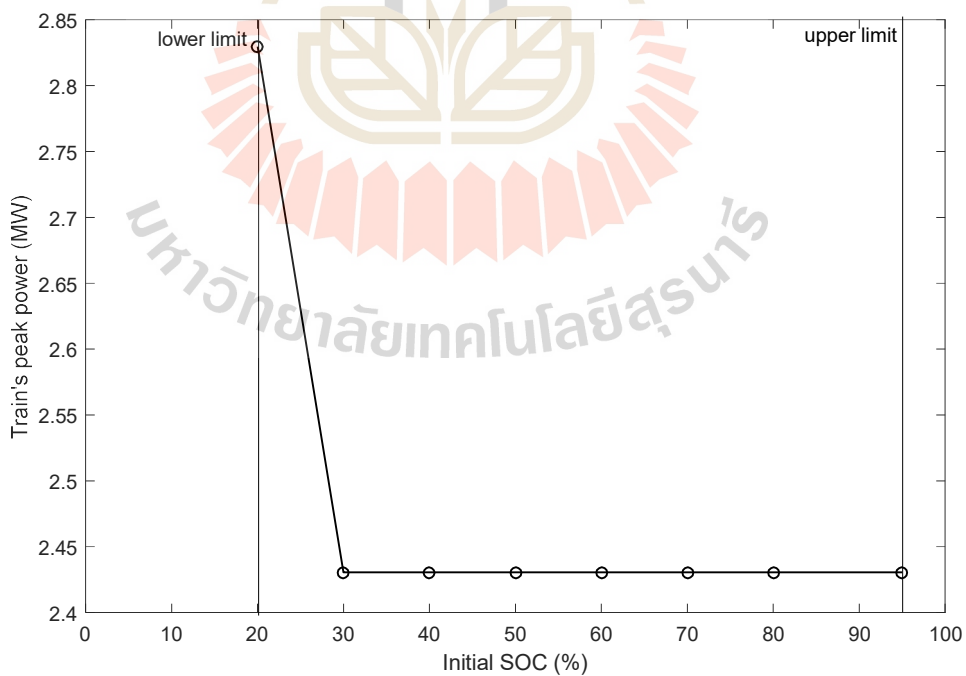
SOC_{start} (%)	E_{sub} (kWh)	E_{tr} (kWh)	E_{loss} (kW)	E_{reg} (kWh)	E_{waste} (kWh)	$P_{tr,max}$ (MW)	$P_{sub,max}$ (MW)	$V_{tr,min}$ (V)	$V_{sub,min}$ (V)	$V_{rail,max}$ (V)	$I_{stray,max}$ (A)	SOC_{end} (%)	T_{trip} (sec)
20	263.3213	252.7138	10.60746	70.20993	2.418806	2.829585	3.034911	614.2142	728.8536	135.7349	12.8861	95	1538.7
30	262.3512	252.0219	10.32935	70.20993	2.416679	2.430481	2.407555	649.75	742.377	108.3276	10.2422	95	1538.7
40	261.4495	251.3257	10.12373	70.20993	2.408506	2.430481	1.999745	673.3028	750.8923	90.14858	8.504256	95	1538.7
50	260.6015	250.6399	9.961599	70.20993	2.415242	2.430481	1.752448	680.7967	755.9582	77.75417	7.064368	95	1538.7
60	259.7825	249.9502	9.832274	70.20993	2.416387	2.430481	1.752448	680.7967	755.9582	77.75417	5.990228	95	1538.7
70	259.0051	249.2714	9.733692	70.20993	2.433373	2.430481	1.752448	680.7967	755.9582	77.75417	5.990228	95	1538.7
80	258.2175	248.5656	9.651846	70.20993	2.411224	2.430481	1.752448	680.7967	755.9582	77.75417	5.990228	95	1538.7
95	257.0805	247.515	9.565448	70.20993	2.389647	2.430481	1.752448	680.7967	755.9582	77.75417	5.990228	95	1538.7



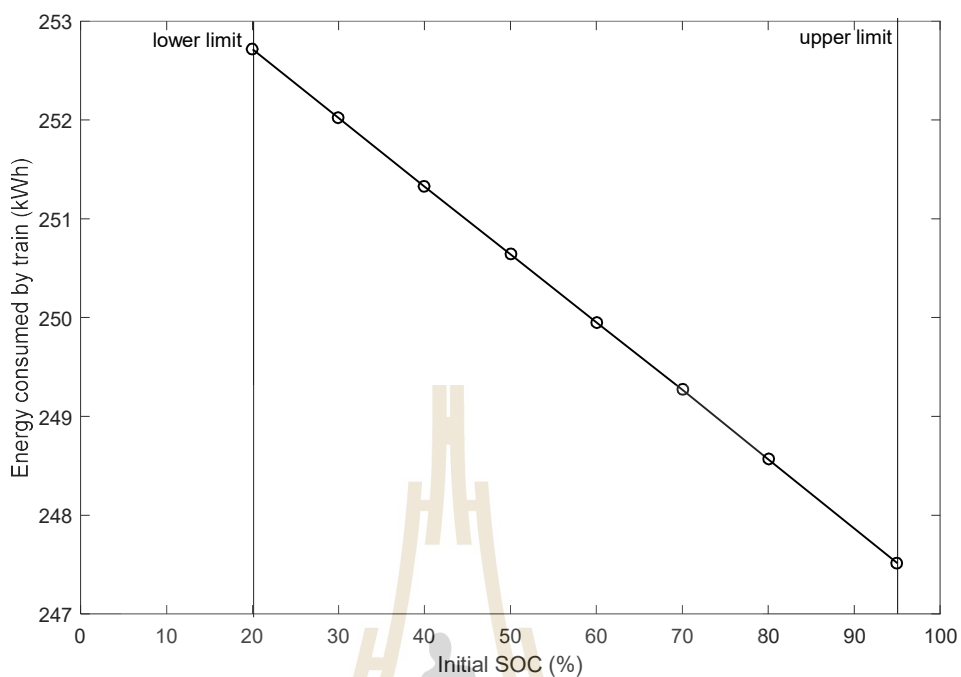
4) ผลการทดสอบกลยุทธ์ที่ 4 (Peak demand cutting strategy)



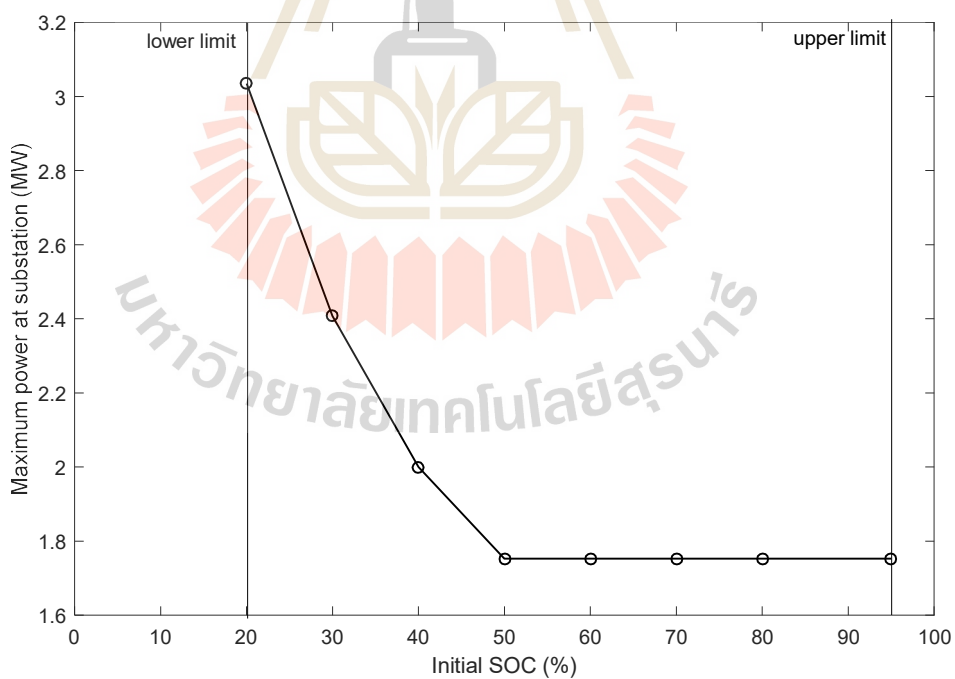
รูปที่ ก.31 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของกลยุทธ์ที่ 4



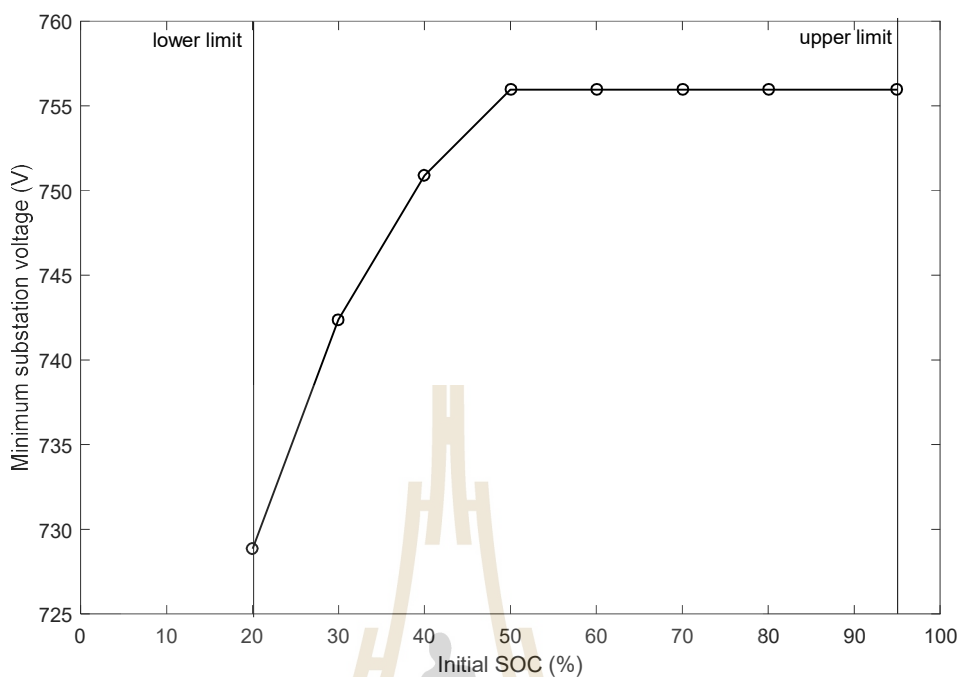
รูปที่ ก.32 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4



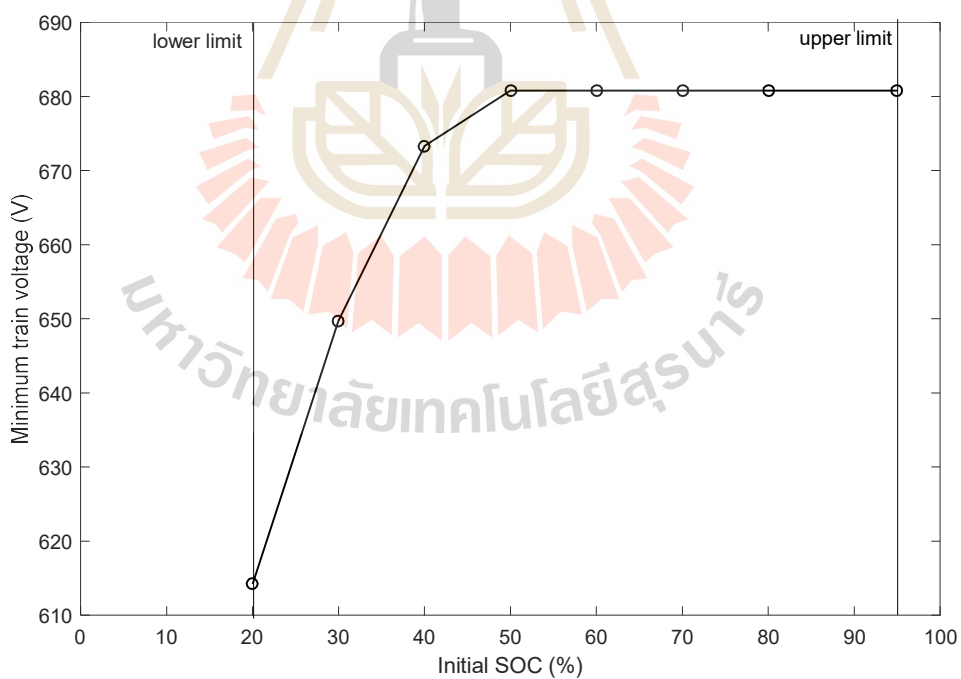
รูปที่ ก.33 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4



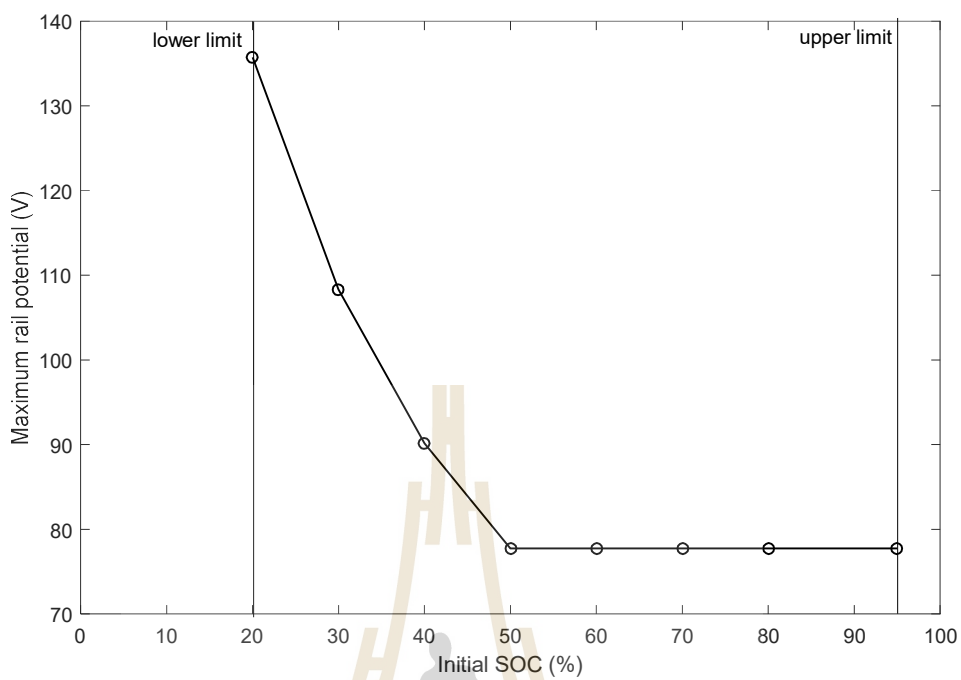
รูปที่ ก.34 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4



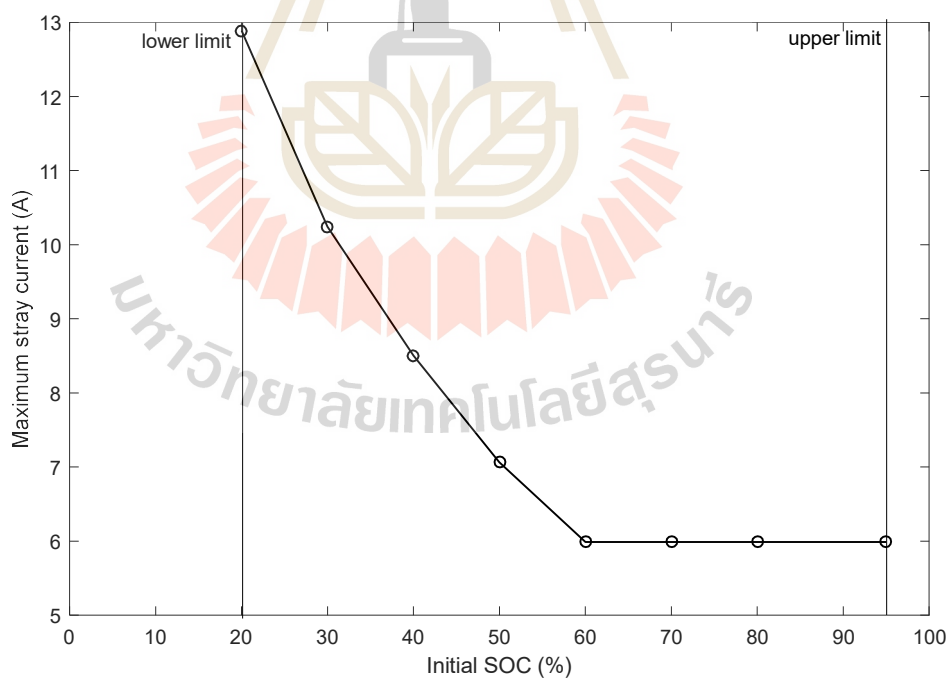
รูปที่ ก.35 ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4



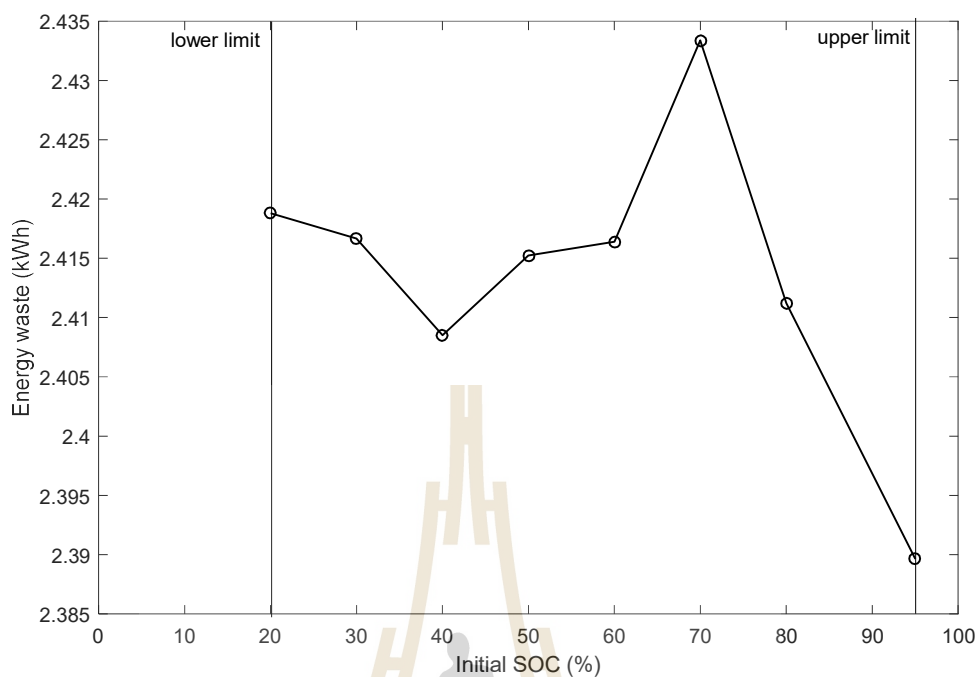
รูปที่ ก.36 ผลของแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าต่ำสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4



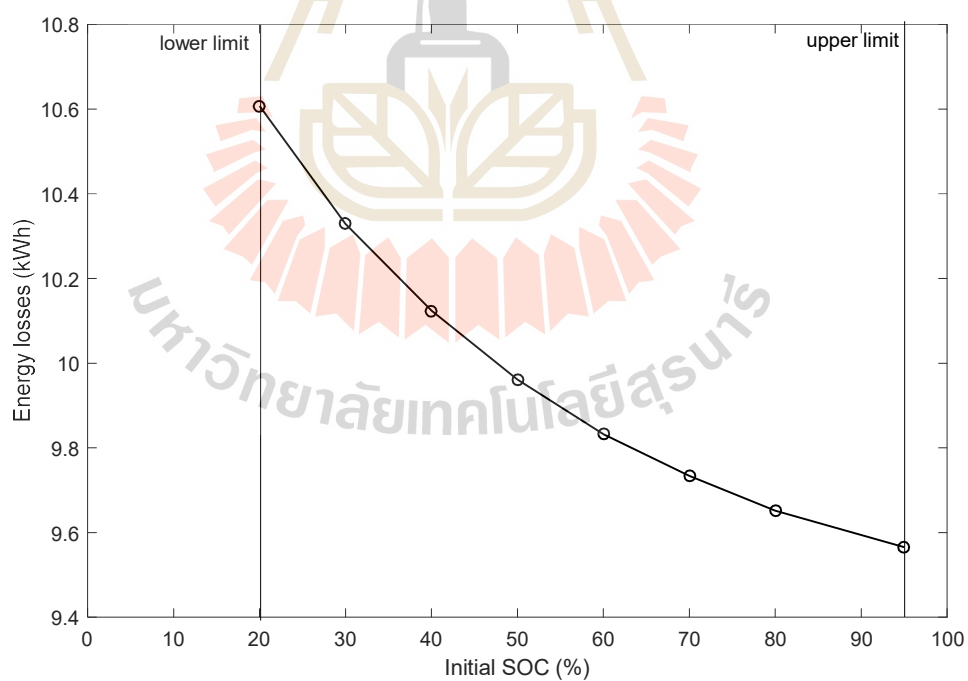
รูปที่ ก.37 ผลของแรงดันรางสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4



รูปที่ ก.38 ผลของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลสูงสุดเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4



รูปที่ ก.39 ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรกเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4



รูปที่ ก.40 ผลของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมเมื่อใช้กลยุทธ์ที่ 4

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- **Conferences papers**

C. Sumpavakup and T. Kulworawanichpong, “Optimal Multi-Objective Train Speed Profile for Mass Transit Systems Using Genetic Algorithms”, The 3rd Annual Conference on Engineering and Information Technology (ACEAIT), Osaka, Japan, March 22-24, 2015: 734.

C. Sumpavakup and T. Kulworawanichpong, “Optimizing Train Speed Profile to Energy Saving for Mass Transit System”, The Ninth National Transport Conference (NTC 9), Bangkok, Thailand, November 20-21, 2014:1-6.

- **Journals**

C. Sumpavakup, T. Ratniyomchai and T. Kulworawanichpong, “Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy”, Journal of Modern Transportation, 2017: 1-13.

C. Sumpavakup, S. Suwannakijborihan, T. Ratniyomchai and T. Kulworawanichpong, “Peak Demand Cutting Strategy with On-Board Energy Storage System in Mass Rapid Transit”, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2017, [Accepted].

C. Sumpavakup and T. Kulworawanichpong, “Multi-Train Movement Simulation Using MATLAB Object-Oriented Programming”, Applied Mechanics and Materials, Vol. 763, 2015: 153-158.

C. Sumpavakup and T. Kulworawanichpong, “Optimizing Train Speed Profile for a Mass Transit System Using Differential Evolution”, Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, Vol. 25, No. 4, 2014: 59-69.

ACEAIT-3812
Optimal Multi-Objective Train Speed Profile for Mass Transit Systems
Using Genetic Algorithms

Chaiyut Sumpavakup, Thanatchai Kulworawanichpong^{*}

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

*Corresponding Author: thanatchai@gmail.com

ABSTRACT

This paper presents a movement planning of a mass transit system between two platforms with the goal to minimize total energy consumption and total energy loss during the journey with appropriate weighting factors. Train movement in this work is based on a sequence of four mode operations: i) accelerating mode, ii) constant speed or cruising mode, iii) coasting mode and iv) braking mode. The presented problem is one of optimization problems in which train speed profile is optimized by controlling three parameters: i) acceleration rate ii) deceleration rate and iii) location of coasting point. To achieve this goal the overall energy consumption and energy loss of the proposed journey is minimized. This paper described the use of Genetic Algorithms (GAs) as a potential tool to solve the problem. The test system used in this work is a simple mass transit section between two platforms with the service distance of 2 km and the maximum speed limit of 80 km/h. The results showed that solving such a problem by using GAs with multi-objective functions can considerably reduce the overall energy consumption and total energy loss.

Keyword: Train speed profile, Energy consumption, Optimization, Genetic Algorithms

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้ามหานคร Optimizing Train Speed Profile to Energy Saving for Mass Transit System

ชัยยุทธ์ สัมภาษณ์* และ ธนัชชัย กุลอรานิชพงษ์

* สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวางแผนการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครระหว่างสถานีโดยมีเป้าหมายให้ใช้พลังงานน้อยที่สุด การทำงานของรถไฟฟ้ามหานครมีทั้งหมด 4 โหมดตามลำดับ คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการแล่น และโหมดการเบรก ปัญหาที่น่าสนใจคือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของลักษณะสมบัติความเร็วของรถไฟฟ้ามหานครควบคุมผ่านตัวแปร 3 ตัว คือ อัตราเร่งในโหมดการเร่ง อัตราหน่วงในโหมดการเบรก และตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น เพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครใช้พลังงานน้อยที่สุด การแก้ปัญหาใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ระบบทดสอบที่นำมาใช้เป็นระบบรถไฟฟ้ามหานครที่มีสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ระยะทางระหว่างสถานีมีค่าเท่ากับ 2 กิโลเมตร กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ไว้ที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากการจำลองพบว่า เมื่อมีการควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้ามหานครอย่างเหมาะสมด้วยวิธี GA สามารถช่วยให้อัตราประหยัดพลังงานรถไฟฟ้ามหานครที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครได้ 28.17% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน

Abstract

This paper presents a movement planning of a mass transit system between two platforms with the goal to minimize total energy consumption during the journey. Train movement in this work is based on a sequence of four mode operations: i) accelerating mode, ii) constant speed or cruising mode, iii) coasting mode and iv) braking mode. The presented problem is one of optimization problems in which train speed profile is optimized by controlling three parameters: i) acceleration rate ii) deceleration rate and iii) location of coasting point. To achieve this goal the overall energy consumption of the proposed journey is minimized. This paper described the use of Genetic Algorithms (GAs) as a potential tool to solve the problem. The test system used in this work is

a simple mass transit section between two platforms with the service distance of 2 km and the maximum speed limit of 80 km/h. The results showed that solving such a problem by using GAs can considerably reduce the overall energy consumption by 28.17% compared with the base case.

Keywords: Train speed profile, Energy consumption, Optimization, Genetic Algorithms

1. คำนำ

การประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้ามหานครมีการศึกษามากมาย มีวิธีที่ช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้หลากหลายวิธี เช่น การลดความเร็วของรถไฟฟ้ามหานครตามข้อมูลความเร็วของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุด [1] การใช้พลังงานคืนกลับจากการเบรกมาจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนเพื่อช่วยลดกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายจากแหล่งจ่ายภายนอก และการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงาน เป็นต้น การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุดเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยในการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้ามหานคร แบ่งเป็น 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการแล่น และโหมดการเบรก [2,3] แต่การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครมีความซับซ้อนและมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จึงไม่สามารถทำได้ง่ายโดย [4] ซึ่งที่ผ่านมามีงานวิจัยหลากหลายในประเด็นดังกล่าว เช่น การลดพลังงานโดยใช้ระบบควบคุมสำหรับการควบคุมการแล่นแบบไดนามิก (dynamic coast control) ในรถไฟฟ้ามหานคร [5] การลดกำลังไฟฟ้าจ่ายและการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ามหานคร โดยการควบคุมเวลาการวิ่งของรถไฟ [6] วิธีการเดินรถไฟฟ้ามหานครเพื่อประหยัดพลังงานสำหรับรถไฟฟ้ามหานคร [7] เป็นต้น ส่วนงานวิจัยที่นำวิธีเชิงปัญญาประดิษฐ์มาใช้กับประเด็นดังกล่าว เช่น การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุดด้วยการควบคุมการแล่นโดยใช้วิธี GA [8] เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุด โดยควบคุมการทำงานผ่านตัวแปร 3 ตัว คือ อัตราเร่งในโหมดการเร่ง อัตราเร่งในโหมดการเบรก และตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น เพื่อให้การ

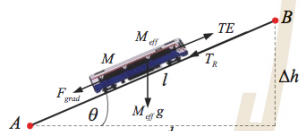
* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: c.sumpavakup@gmail.com

เคลื่อนที่ของรถไฟใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมน้อยที่สุดด้วยวิธี GA ซึ่งวิธีนี้สามารถหลีกเลี่ยงจุดที่คล้ายกับจุดที่ต่ำที่สุดหรือค่าขอบที่เฉพาะที่ (local minima) ได้ดีเมื่อเทียบกับวิธี Hill-Climbing, Gradient search หรืออื่น ๆ ไม่อ่อนไหวต่อปัญหาไม่เชิงเส้น อีกทั้งยังง่ายและยืดหยุ่นในการนำไปใช้งานอีกด้วย [1] ในส่วนแรกของบทความกล่าวถึงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ ส่วนที่สองแสดงรายละเอียดการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA ส่วนที่สามแสดงรายละเอียดการทดสอบและผลการทดสอบ ส่วนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์และสรุปผล

2. แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟแสดงดังรูปที่ 1 มีแรงที่ต้องนำมาพิจารณา ดังนี้ แรงจลนของขบวนรถไฟ (tractive effort) แรงเกรเดียนต์ (gradient force) แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟ (train resistance force) ดังนั้นสมการพื้นฐานการเคลื่อนที่ของรถไฟพิจารณาด้วยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1 แผนภาพการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ

$$F = TE - F_{grad} - T_R = M_{eff} \alpha \tag{1}$$

โดยที่

TE คือ แรงจลนขบวนรถไฟ (tractive effort; N)

F_{grad} คือ แรงเกรเดียนต์ (gradient force; N)

T_R คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟ (train resistance force; N)

M_{eff} คือ ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักขบวนรถไฟ (effective vehicle mass; kg)

α คือ ความเร่งขบวนรถไฟ (train acceleration; m/s²)

2.1 แรงจลนและแรงเบรกขบวนรถไฟ

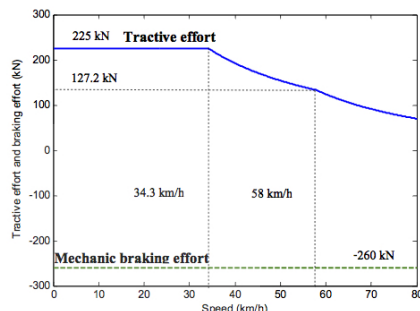
แรงขับเคลื่อนรถไฟหรือแรงจลนขบวนรถไฟได้มาจากมอเตอร์ลากจูงขับเคลื่อนเพลาของมอเตอร์ซึ่งนำมาขับล้อขบวนรถไฟ [9] ผู้ผลิตรถไฟจะทำการทดสอบและนำเสนอในรูปของแรงจลนขบวนรถไฟเทียบกับความเร็วขบวนรถไฟ คุณลักษณะโดยทั่วไปของแรงจลนขบวนรถไฟที่แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนแรงเบรกขบวนรถไฟที่มาก็จะได้รับการทดสอบของผู้ผลิตรถไฟเช่นกันขึ้นอยู่กับใช้เบรกทางกล (mechanical brake) หรือเบรกทางไฟฟ้า (electrical brake)

2.2 แรงเกรเดียนต์

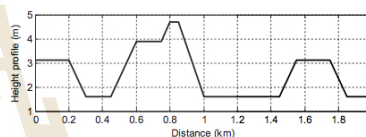
การลากรถไฟซึ่งมีน้ำหนักมากขึ้นนั้นต้องใช้แรงลากอย่างมาก โดยทั่วไปเส้นทางรถไฟขบวนส่งมวลชน ระดับเกรเดียนต์หรือความชันจะน้อย และจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความชันบ่อย [10] ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 และมักแสดงในรูปของ $\Delta h / l$ ซึ่ง Δh คือ ระยะใน

แนวตั้ง / คือ ระยะความชันหรือระยะในแนวระนาบจากจุด A ไปยังจุด B แสดงดังรูปที่ 1 แรงเกรเดียนต์หรือแรงเนื่องจากความลาดเอียงของการเคลื่อนที่ สามารถหาได้ดังสมการที่ (2)

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta = \frac{M_{eff} g \Delta h}{l} \tag{2}$$



รูปที่ 2 คุณลักษณะแรงจลนและแรงเบรกขบวนรถไฟ



รูปที่ 3 Gradient profile

2.3 แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การเคลื่อนที่ของรถไฟจะมีแรงต้านซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อกับรางและแรงต้านอากาศ เรียกโดยรวมว่า แรงต้านการเคลื่อนที่ (resistance force) ค่าความต้านทานโดยรวมของรถไฟสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [10]

$$T_R = A + Bv + Cv^2 \tag{3}$$

โดยที่ v คือ ความเร็วขบวนรถไฟ (km/h) และ A (kN), B (kN/h/km) และ C (kN²/km²) คือ สัมประสิทธิ์เดวิส (Davis coefficients) ซึ่งทุกตัวเป็นค่าคงที่ [11]

2.4 ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักขบวนรถไฟ

ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักขบวนรถไฟสามารถหาได้จากสมการที่ (4) [10]

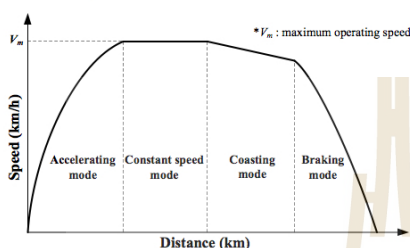
$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) \tag{4}$$

โดยที่ M_t คือ น้ำหนักรถเปล่า (tare weight; kg)

λ_w คือ ตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร (passenger mass factor)

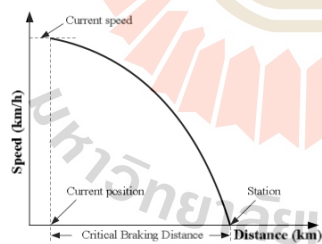
2.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

รูปแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะพิจารณาจากโหมดการทำงานของรถไฟฟ้า โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง (accelerating mode) โหมดความเร็วคงที่ (constant speed mode) โหมดการแล่น (coasting mode) และ โหมดการเบรก (braking mode) [3,12] ดังรูปที่ 4 โดยแรงจุดขบวนรถไฟฟ้าในแต่ละโหมดขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมที่ใช้



รูปที่ 4 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

โหมดการเร่งจะเริ่มเร่งความเร็วจากสถานีด้วยความเร่งที่กำหนดจนถึงความเร็วทำงาน (service speed) โดยค่าความเร่งของรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวก (α_{acc}) และแรงจุดขบวนรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) เมื่อความเร็วของรถไฟฟ้าถึงความเร็วทำงานก็จะเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่ โหมดนี้จะรักษาความเร็วไว้ที่ความเร็วทำงาน ($\alpha=0$) จนกระทั่งถึงตำแหน่งเริ่มโหมดการแล่น (L_{coast}) เมื่อถึงโหมดการแล่น โหมดนี้แรงจุดขบวนรถไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ ($TE=0$) และค่าความเร่งจะมีค่าเป็นลบแต่อย่างไรก็ตามความเร่งสามารถมีค่าเป็นบวกได้ในกรณีที่ลงเนินลาดชัน และจะเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรกก็ต่อเมื่อถึงความเร็วที่ต้องเบรกด้วยความเร่งเป็นลบ (α_{dec}) หรือถึงระยะที่จะต้องเบรก ในบทความนี้จะหาระยะที่จะต้องเบรกเพื่อจะเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การควบคุมการทำงานโหมดเบรก

จากรูปที่ 5 แสดงการหาระยะเบรก (Critical Braking Distance: CBD) เพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5) [10]

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha_{dec}} \quad (5)$$

2.6 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับแรงจุดขบวนรถไฟฟ้า ความเร็วของรถไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (η ; %) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) [3]

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (6)$$

2.7 การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่

การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$v_i = v_j + \alpha \Delta t \quad (7)$$

$$s_i = s_j + v_j \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (8)$$

โดยที่ v_j และ v_i คือ ความเร็วรถไฟฟ้าหลังและก่อนปรับปรุง Δt คือ time step (ในบทความนี้ใช้ 0.1 วินาที) s_j และ s_i คือ ตำแหน่งรถไฟฟ้าหลังและก่อนปรับปรุง

2.8 สรุปขั้นตอนการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

- การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้
- ขั้นตอนที่ 1 : ใช้ค่าความเร็วของรถไฟฟ้าจากการปรับปรุงครั้งก่อนหน้าและความเร่งที่ตำแหน่งปัจจุบันประเมินแรงจุดขบวนรถไฟฟ้า (สมการที่ (1)) และกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ (สมการที่ (6))
 - ขั้นตอนที่ 2 : หาค่าแรงเคลื่อนที่ (สมการที่ (2)) ความต้านทานของรถไฟฟ้า (สมการที่ (3)) ค่าประสิทธิภาพของนำหนักรถไฟฟ้า (สมการที่ (4)) และคำนวณความเร่งของรถไฟฟ้า (สมการที่ (1))
 - ขั้นตอนที่ 3 : ปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า (สมการที่ (7) และ (8))

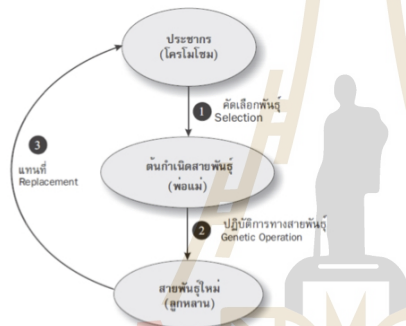
3. การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหรือที่เรียกโดยย่อว่า GA ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 60 โดยจำลองเอาแนวคิดของการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยามาใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ [8] GA เป็นวิธีการค้นหาค่าที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ GA เป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนของการค้นหาค่าที่ดีที่สุด และได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary

computing) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด

วัฏจักรของ GA โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 6 [13] ได้แก่

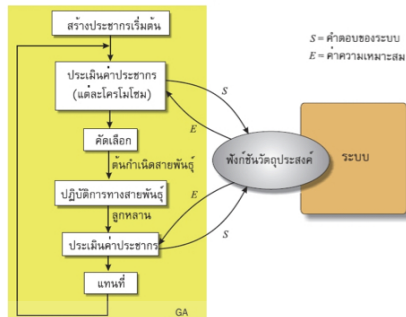
- 1) การคัดเลือกสายพันธุ์ (selection) คือ ขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบ ไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้เกิดลูกหลานในรุ่นถัดไป
- 2) ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (genetic operation) คือ กรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์ เป็นขั้นตอนการสร้างลูกหลาน โดยปกติทั่วไปจะมีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์ (crossover) และการทำมิวเทชัน (mutation)
- 3) การแทนที่ (replacement) คือ ขั้นตอนการนำเอาลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อน เป็นขบวนการในการคัดเลือกกว่าควรจะเอาลูกหลานในกลุ่มใด จำนวนเท่าไร ไปแทนประชากรเก่าในกลุ่มใด



รูปที่ 6 วัฏจักรของ GA

ประชากร (population) ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม (chromosome) ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าตอบในระบบที่ต้องการค้นหา **ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (parents)** กลุ่มประชากรที่ถูกคัดเลือกเพื่อเป็นตัวแทนในการให้กำเนิดสายพันธุ์ใหม่ในรุ่นถัดไป (next generation) **สายพันธุ์ใหม่ (offspring)** หรือลูกหลาน เป็นประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่ โดยคาดหวังที่จะได้รับสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเพื่อถ่ายทอดต่อไป

กระบวนการภายในของ GA ทำให้คำตอบของระบบที่มีอยู่เกิดวิวัฒนาการในตัวเองอันจะนำไปสู่การปรับตัวให้กลายเป็นคำตอบที่ดีกว่า และดีที่สุดได้ ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของ GA กับการเชื่อมโยงเข้ากับระบบแสดงดังรูปที่ 7 [13]



รูปที่ 7 ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของ GA กับการเชื่อมโยงเข้ากับระบบ

ในบทความนี้จะทำการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่โดยรวม (E) คำนวณที่สุดท้ายได้เงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งตัวแปรที่มีผลกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ คือ อัตราเร่งในโหมดการเร่ง (α_{acc}) อัตราหน่วงในโหมดการเบรก (α_{dec}) และตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น (L_{coast}) ซึ่งจะเป็นระยะทางจากตำแหน่งเริ่มต้นโหมดความเร็วจนถึงตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น ดังนั้นจะได้รูปแบบฟังก์ชันจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดดังนี้

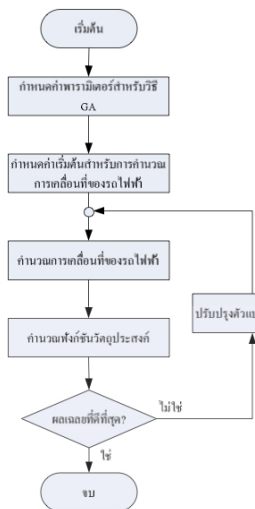
$$\begin{aligned} \text{Minimize } E &= \sum_{i=1}^N P_i \times \Delta t_i \\ \text{Subject to } \alpha_{acc}^{\min} &\leq \alpha_{acc} \leq \alpha_{acc}^{\max} \\ \alpha_{dec}^{\min} &\leq \alpha_{dec} \leq \alpha_{dec}^{\max} \\ L_{coast}^{\min} &\leq L_{coast} \leq L_{coast}^{\max} \end{aligned}$$

Time and distance services

ขั้นตอนการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งในบทความนี้ใช้กล่องเครื่องมือ "ga" ในโปรแกรม MATLAB [14] และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธี GA ดังนี้ Populations: 50, Generation: 100, Crossover: 0.8, TolFun: 1e-6

4. ระบบทดสอบและผลการทดสอบ

ระบบทดสอบเป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทความจุมาก (high-capacity mass transit) ตัวอย่างมีสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ระยะทาง 2 กิโลเมตร การทดสอบจะพิจารณาการนำพลังงานจากการเบรกมาใช้งาน โดยกำหนดให้พลังงานที่นำมาใช้จากการเบรกมีประสิทธิภาพ 100% และไม่พิจารณาแหล่งจ่ายไฟ เปรียบเทียบผลกับกรณีฐานซึ่งกำหนดให้ α_{acc} , α_{dec} และ L_{coast} มีค่าเท่ากับ 0.8 m/s^2 , -0.9 m/s^2 และ 0.3 km ตามลำดับ รายละเอียดพารามิเตอร์และเงื่อนไขสำหรับการจำลองผลแสดงดังตารางที่ 1 การจำลองผลใช้โปรแกรม MATLAB การทดสอบกำหนดความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้



รูปที่ 8 ขั้นตอนการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA

ตารางที่ 1 เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผล

Specific data	Information	
Unit configuration	4-car-train	
Voltage Conditions	nominal voltage	750 V
	tare weight	153 ton
Weight Conditions	max. payload	85 ton
	max. speed	80 km/h
Movement Features	max. acceleration	0.87 m/s ²
	max. deceleration	1.00 m/s ²
Efficiencies	gear	98%
	motor	88%
	inverter	98%
Max. Auxiliaries	constant load	270 kW
Train resistance formula	A = 4025	สมการที่ (3)
	B = 118.67	
	C = 0.871	
Traction effort diagram	รูปที่ 2	
Braking effort diagram	รูปที่ 2	
Gradient profile	รูปที่ 3	
Number of trains	1 ขบวน	

ตารางที่ 2 แสดงผลเฉลยที่ได้จากวิธี GA โดยการทดสอบซ้ำ 31 ครั้ง พบว่าผลเฉลยที่ได้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) น้อย ซึ่งพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าตอบ ถ้าค่าตอบส่วนใหญ่อยู่ใกล้กับค่าเฉลี่ยมาก SD จะมีค่าน้อย โดยถ้าค่าตอบทุกตัวเท่ากันหมด ไม่มีการ

กระจายตัว ค่า SD จะเท่ากับ 0 นั่นแสดงว่าค่าของตัวแปรควบคุมที่หาได้ด้วยวิธี GA ไม่กระจายตัวมากนักเอง ส่วนตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพการหาค่าตอบของวิธี GA พบว่ารถไฟใช้พลังงานไฟฟ้าในการเคลื่อนที่จากสถานีต้นทางไปยังปลายทางเพียง 12.0297 kWh และมีค่า SD น้อย ส่วนกรณีฐานใช้พลังงานไฟฟ้าถึง 15.4179 kWh รูปที่ 9 แสดงการเข้าสู่ค่าตอบของวิธี GA จะเห็นว่าผลเฉลยที่ได้จะอยู่ใน Generation ที่ 52 โดยหยุดการค้นหาเนื่องจากเงื่อนไขข้อ TolFun น้อยกว่าค่าที่กำหนด ผลลัพธ์ที่หาได้จากวิธี GA เทียบกับกรณีฐาน แสดงได้ดังรูปที่ 10 และ 11

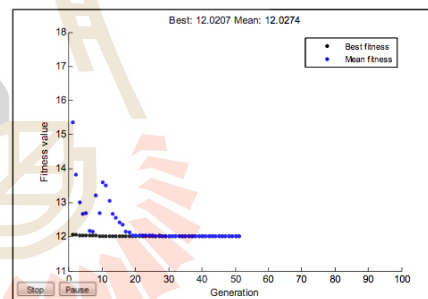
ตารางที่ 2 ผลเฉลยการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA

Control variables	Genetic Algorithm (GA)			
	Min	Average*	Max	SD
α_{acc} (m/s ²)	0.8104	0.8539	0.8697	0.0210
α_{dec} (m/s ²)	-0.9101	-0.9894	-0.9953	0.0285
L_{cost} (km)	0.3298	0.6135	0.6387	0.1362

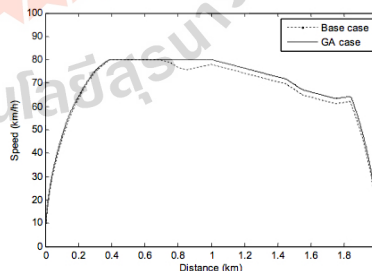
หมายเหตุ * คือ ค่ามาตรฐานที่ได้จากทดสอบซ้ำ 31 ครั้ง

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการหาค่าตอบด้วยวิธี GA

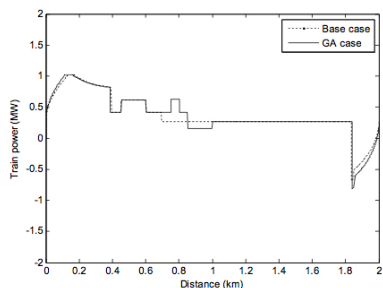
Methods	E (kWh)			SD
	Min	Average	Max	
Base case	-	15.4179	-	-
GA	12.0057	12.0297	12.0365	0.0419



รูปที่ 9 การเข้าสู่ค่าตอบของวิธี GA



รูปที่ 10 ลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟ



รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้เคลื่อนที่

รูปที่ 10 แสดงลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟ จะเห็นได้ว่าลักษณะสมบัติความเร็วของรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงโหมดการทำงานอยู่ตลอด ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของเกรเดียนต์ดังรูปที่ 3 และใช้เวลาในการเดินทางทั้งสิ้น 117.7 วินาที จากสถานีต้นทางจนถึงสถานีปลายทาง ส่วนรูปที่ 11 แสดงกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้เคลื่อนที่ จะเห็นได้ว่าเมื่อการทำงานของรถไฟอยู่ในโหมดการเร่งจะมีการใช้กำลังไฟฟ้าสูงถึง 1.03 MW และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่ เมื่อเข้าสู่โหมดการแล่นกำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีเพียงโหลดอุปกรณไฟฟ้าภายในรถเท่านั้นซึ่งจะใช้กำลังไฟฟ้า 270 kW และเมื่อถึงโหมดเบรกจะมีการนำพลังงานจากการเบรกมาใช้เพื่อการประหยัพลังงานด้วย ซึ่งเกิดจากกำลังไฟฟ้าที่มีค่าเป็นลบ โดยกรณี GA จะใช้พลังงานโดยรวมในการเคลื่อนที่น้อยกว่ากรณีฐาน 28.17% เนื่องจากได้พลังงานคืนกลับจากการเบรกมากกว่านั่นเอง

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟที่ขนส่งมวลชนภายใต้เงื่อนไขการทำงานของรถไฟเพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถไฟใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมน้อยที่สุดด้วยวิธี GA โดยทดสอบกับระบบรถไฟที่ขนส่งมวลชนตัวอย่างมี 2 สถานีผู้โดยสาร ระยะทาง 2 กิโลเมตร ผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการควบคุมการทำงานของรถไฟอย่างเหมาะสมด้วยวิธี GA สามารถช่วยให้ประหยัพลังงานไฟฟ้าโดยรวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟได้ 28.17% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการจำลองผลระบบรถไฟหลายขบวน (multi-train simulation) ได้ในอนาคต ไม่ว่าจะ เป็นระบบรถไฟที่เกาะแตรตรง (DC railway) หรือระบบรถไฟที่เกาะแตรสลับ (AC railway) และในอนาคตอาจเพิ่มการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) ของแต่ละตัวแปร เพื่อเป็นการทดสอบความมั่นคงของข้อสรุปที่ได้ ตลอดจนข้อสมมติพื้นฐานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก ประจำปีการศึกษา 2556 (PHD/0038/2556)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.V. Bochamnikov, A.M. Tobias, C. Roberts, S. Hillmansen and C.J. Goodman, "Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways", *IET Electric Power Applications*, vol. 1, issue. 5, pp. 675–682, 2007.
- [2] C.J. Goodman, "Train performance and simulation", Fourth Vocation School on Electric Traction Systems, *IEE Power Division*, April 1997.
- [3] T. Kulworawanichpong, "Optimising AC electric railway power flows with power electronic control", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
- [4] J.C. Jong and S.Chang, "Algorithms for generating train speed profiles", *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 6, pp. 356 - 371, 2005.
- [5] B. Mellitt, S. Sujitjorn, C.J. Goodman, and N.B. Rambukwella, "Energy minimisation using an expert system or dynamic cost control in rapid transit trains". *Int. Conf. on Railway Engineering*, 1987, pp. 48–52.
- [6] T. Albrecht, "Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control", *Computers in railways IX (WIT Press, 2004)*, pp. 885–894, 2004.
- [7] P. Lukaszewicz, "Energy-saving driving methods for freight trains", *Computers in railways IX (WIT Press, 2004)*, pp. 901–909, 2004.
- [8] C.S. Chang, and S.S. Sim, "Optimising train movements through coast control using genetic algorithms", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 144, no. 1, pp. 65–73, 1997.
- [9] Applications of Mathematics, "Tractive effort, acceleration and braking", *The Mathematical Association*, 2004. (www.m-a.org.uk)
- [10] S. Lu, "Optimising power management strategies for railway traction", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, October 2011.
- [11] B. P. Rochard and F. Schmid, "A review of methods to measure and calculate train resistances", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 214, no. 4, pp. 185–199, 2000.
- [12] K. Kim, "Optimal train control on various track alignments considering speed and schedule adherence constraints", PhD Thesis, New Jersey Institute of Technology, USA, January 2010.
- [13] A.Srikaew, "Computational Intelligence", *Suranaree University of Technology*, 2009, pp. 65-82.
- [14] The MathWorks Inc., *Genetic Algorithms and Direct Search TOOLBOX, CD-ROM Manual*, 2004.



CrossMark

Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy

Chaiyut Sumpavakup¹ · Tosaphol Ratniyomchai¹ · Thanatchai Kulworawanichpong¹ 

Received: 4 July 2017 / Revised: 27 September 2017 / Accepted: 7 October 2017
© The Author(s) 2017. This article is an open access publication

Abstract A problem of peak power in DC-electrified railway systems is mainly caused by train power demand during acceleration. If this power is reduced, substation peak power will be significantly decreased. This paper presents a study on optimal energy saving in DC-electrified railway with on-board energy storage system (OBESS) by using peak demand cutting strategy under different trip time controls. The proposed strategy uses OBESS to store recovered braking energy and find an appropriated time to deliver the stored energy back to the power network in such a way that peak power of every substations is reduced. Bangkok Mass Transit System (BTS)-Silom Line in Thailand is used to test and verify the proposed strategy. The results show that substation peak power is reduced by 63.49% and net energy consumption is reduced by 15.56% using coasting and deceleration trip time control.

Keywords DC-electrified railway · Energy saving · On-board energy storage system · Regenerative braking energy · Peak power reduction

1 Introduction

Recently, the demand for public transport has rapidly increased around the world. Many countries in Asia such as Thailand, Singapore and India have plans to expand the existing routes in their mass transit systems to cover all urban areas [1]. Energy efficiency and management are undoubtedly the big challenges in the railway systems [2]. In electric traction systems, recuperation of the braking energy highly improves energy efficiency [3, 4]. Depending on the driving cycle and control strategy, energy saving could be achieved by approximately 8% to as much as 25% of the total energy drawn by the vehicle [5]. An urban rail transit is characterized by many service stations with frequent acceleration and braking of trains that increases the potential of braking energy recuperation using energy storage system (ESS). There are two main applications of ESS in the electrified railway: (1) trackside energy storage system (TESS) and (2) on-board energy storage system (OBESS). With the OBESS, regenerated braking energy is stored in the OBESS when the line is not receptive and there is no adjacent train demanding high power. The stored energy will then be used to support train acceleration or within an appropriate condition. Gonzalez-Gil et al. [6] explains that the OBESS has higher efficiency than TESS and its energy management is simpler as there are no line losses and traffic conditions considerations.

In general, the purposes of the regenerative braking energy management with OBESS are increasing energy efficiency [7–9], reducing peak power of substations [10] and stabilizing network voltage [11, 12]. The research presented in this paper is devoted to reducing substation peak power mainly in DC metro systems. In Ref. [10], a 25% reduction of the overall railway electricity cost was achieved by reducing substation peak power during train

✉ Thanatchai Kulworawanichpong
thanatchai@gmail.com

Chaiyut Sumpavakup
nonny.ee@gmail.com

Tosaphol Ratniyomchai
tosaphol@sut.ac.th

¹ School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

acceleration. In Thailand, electricity tariff consists of 4 types of charges: energy charge (THB/kWh), demand charge (THB/kW), service charge (THB/month) and power factor charge (THB/kvar). The demand charge is defined as the maximum 15-minute integrated demand during on peak over the monthly billing period. Reducing peak power can significantly reduce the total monthly bill. With the OBESS, there are two parameters that affect energy saving: (1) the number of the OBESS modules, which has impact on the effective weight of the train and consequently energy consumption and (2) initial state of charge (SOC) of the OBESS, which has impact on the functional restrictions of the OBESS. Therefore, the problem has been tackled by finding the suitable parameters of the number of OBESS modules and the initial SOC for optimal energy saving. Several energy-saving strategies incorporating OBESS have been presented in the literature, each of which has some difficulties, such as the rule-based strategies (RBS) [11, 13], the strategy based on the SOC [14] and the control strategies based on fuzzy logic [15]. However, optimizing the starting point of OBESS discharge is difficult in real-time simulation.

This paper studies the optimal energy saving in DC metro systems using OBESS with peak demand cutting strategy. The aim is to evaluate how much an optimized set can maximize energy saving under different trip time controls. The operated design criteria of the OBESS, the strategy of the power flow controller and the trip time control are proposed. The Bangkok Transit System (BTS)-Sky train Green Line in Bangkok, Thailand, is used for testing and analysing the proposed strategy. The paper is organized into six sections, and Sect. 2 gives basics of electric train simulation, covering train movement and performance, and DC power flow. The strategy for regenerative braking energy management with OBESS and problem formulation for optimal energy saving are described in Sects. 3 and 4, respectively. Section 5 presents simulation results and discussion. Finally, the conclusion is presented in Sect. 6.

2 Simulation as a potential tool

Electrified railway system is a complex system. Electrical characteristics, such as train vehicle performances and operation modes, as well as railway track characteristics, such as curve and gradient profiles, are considered. The single-train simulation (STS) consists of the train movement and performance calculation and the power flow calculation are described as follows:

2.1 Train movement and performance calculation

The performance of an electrified railway is calculated in the STS based on the standard operating curve. The train movement calculations are implemented using Newton's laws of motion, taking into account train resistance, track curve, gradients, speed restriction and modes of operation [16]. The net force applied to accelerate the train is as given in Eq. (1) which relates to Eqs. (2) and (3):

$$F = F_T - R = M_{\text{eff}}\alpha, \quad (1)$$

$$R = F_r + F_g + F_c, \quad (2)$$

$$M_{\text{eff}} = M_t(1 + \lambda_w) + M_1, \quad (3)$$

where F is the net force (N), M_{eff} is the effective mass (kg), α is a train acceleration rate (m/s^2), F_T is the tractive effort of a train (N), R is the overall resistance force of a train (N), F_r is the running resistance force (N), F_g is the gradient resistance force of a train (N), F_c is the curve resistance force of a train (N), M_t is the tare mass (kg), λ_w is the rotary allowance, and M_1 is the freight or passenger load (kg). With a sufficient small step time update, the train performances are calculated according to the mode of train operations. During any journey between two adjacent service stations, the operating mode is simply determined by four consecutive modes with appropriated speed control strategy, e.g., hysteresis control, proportional control [17].

The running resistance force including aerodynamic and the rolling resistance force or the frictional force of a train are described by the Davis equation in Eq. (4):

$$F_r = A + Bv + Cv^2, \quad (4)$$

where v is a train speed (km/h) and the coefficients A (kN), B (kNh/km) and C (kNh^2/km^2) are constants called Davis coefficients [18].

A train is modelled as homogeneous strips with equal weights. This gives a more realistic and accurate model for simulation. Gradient resistance force of a train covering a route section which may not have the same slope is given by Eqs. (5) and (6):

$$F_g = gm_1n_1 + gm_2n_2 + \dots + gm_kn_k, \quad (5)$$

$$m_k = M_{\text{eff}}(L_k/L_t), \quad (6)$$

where g is the gravitational constant (9.81 m/s^2), m_k is the mass of the train covering a distance S_k which is determined by the number of different slopes throughout the length of the train, n_k is a slope of a distance (section) S_k , L_k is the length of a train covering a distance S_k , and the sum of L_1 to L_k is equal to L_t and L_t is the length of a train.

Curve resistance force accounts for energy dissipation at the wheel-rail interface due to sliding, creep and friction. The force is inversely proportional to the radius of the

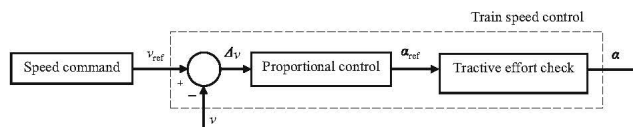


Fig. 1 Proportional control method for train speed control

curved track. The empirical formula of the curve resistance force is the Roeckl's formula in Eq. (7) [19]:

$$F_c = \begin{cases} \frac{6.3}{r(s) - 55} M_{eff}; & \text{for } r(s) \geq 300 \text{ m} \\ \frac{4.91}{r(s) - 30} M_{eff}; & \text{for } r(s) < 300 \text{ m}, \end{cases} \quad (7)$$

where $r(s)$ is the curve radius.

Train speed is controlled by proportional control that calculates acceleration rate from speed mismatch between the actual feedback and the desired speed as presented in Fig. 1. The speed control command is used to determine train operation mode. In this paper, there are three operating modes in train speed control: (1) running mode, (2) braking mode and (3) station stop mode. The provided tractive effort depends on the applied speed control strategy.

Power consumed by a train (P_{tr}) is a summation of tractive power (P_{ta}), ESS power (P_{ESS}) and an auxiliary power (P_{aux}) as given in (8) [20]:

$$P_{tr} = P_{ta} + P_{ESS} + P_{aux}, \quad (8)$$

$$P_{ta} = \begin{cases} \frac{F_T}{\eta} \times v & \text{if } F_T \geq 0, \\ \eta F_T \times v & \text{if } F_T < 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$P_{ESS} = \begin{cases} P_{charge} & \text{if with the ESS and charging mode,} \\ -P_{dis} & \text{if with the ESS and discharging mode,} \\ 0 & \text{if without the ESS,} \end{cases} \quad (10)$$

where η denotes the efficiency of mechanical output power conversion at the wheels to the electrical input power, P_{charge} and P_{dis} are the charge and discharge power of the OBESS, respectively.

2.2 DC traction power supply

In this paper, a computer-based simulation for a train movement integrated with power supply interface is carried out. The DC power network solver needs the locations and the consumed power output data of the traction substation (TSS). Locations data are applied to calculate a system conductance matrix at each calculation step. The power consumption of a train is used to determine the entire

power demands of the DC power supply network, which is defined as load bus in the power network calculation. Generally, a solution of the circuit analysis is obtained by loop equations or nodal equations. With the network of the DC-electrified railway system, the nodal equations are systematic and easily solved by a computer program [21].

Assuming a simplified Norton equivalent circuit of the DC traction power network as shown in Fig. 2, where d is the position of a train, L_{TSS} is the distance between two substations, I_{TSS} and I_s are substation current and substation short-circuit current, respectively, I_{tr} is a train current, R_s is a substation short-circuit resistance, R_{cond} and R_{rail} are the conductor rail and the running rail resistances, respectively. R_{SE} and G_{RE} are the traction substation ground resistance and the rail-to-earth conductance, respectively. A train model is presented by a controlled current model, $I_{tr} = P_{tr}/V_{tr}$. In this paper, the current injection method (CIM) [11] has been applied in the power flow calculation. The updated parameters are obtained by setting up the nodal equations as in Eq. (11). The conductance matrix G in each step of a train travelling is updated by considering the positions of a train and the power consumption is possibly changed according to the train operation modes. An iteration is stopped when the error of the pre-stepped voltage vector at the current iteration is less than the criteria value.

$$I_{6 \times 1} = G_{6 \times 6} V_{6 \times 1}, \quad (11)$$

where $I = [I_{TSS1} \quad -I_{TSS1} \quad I_{TSS2} \quad -I_{TSS2} \quad -I_{tr} \quad I_{tr}]^T$.

3 Strategy for regenerative braking energy management with OBESS

3.1 Regenerative braking energy management with the OBESS

In the viewpoint of energy management in electrified railway operation, Energy Storage Devices (ESDs) are supposed to reduce train energy consumption by recuperating braking energy and supply it back to the train when needed [22]. When a train is braking, the traction motors can act like generators. As previously mentioned, regenerative braking system with OBESS is more efficient than

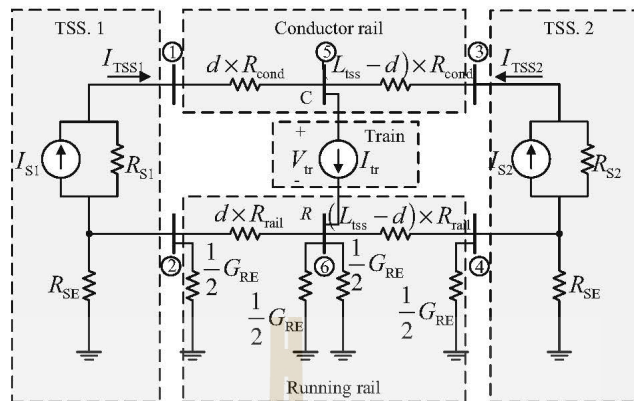


Fig. 2 Equivalent circuit representing the DC traction power supply

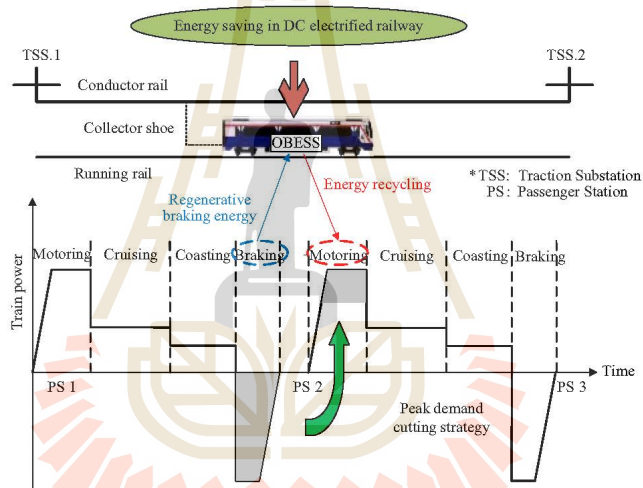


Fig. 3 Regenerative braking energy management with OBESS

the one with TESS due to absence of line losses. Currently, electrochemical double-layer capacitors (EDLCs) have shown great potential to be used as on-board energy storage devices (OBESD) [4]. The characteristics of EDLCs are fast charge and discharge capability, high power density, long life cycles and low internal resistance [23]. The main purpose of the OBESS in this paper is peak power

compensation by recuperating and resupplying train braking energy as summarized in Fig. 3.

3.2 Proposed peak cutting strategy

Peak power reduction during train acceleration is achieved by controlling charge and discharge of the OBESS. Train power flows when braking and accelerating are shown in

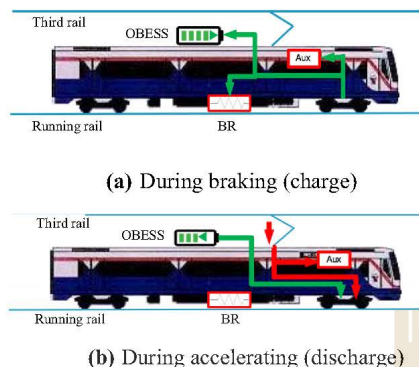


Fig. 4 Power flow in the train equipped with OBESS

Fig. 4. The MITRAC energy saver unit based on EDLC produced by Bombardier Company is chosen for the ESS in this paper because it has high energy density (Wh/kg) per module compared to the products from other companies [24].

Charge and discharge of OBESD depend on train power demand and SOC of the OB ESD. When a train is braking the OBESD is recharged if it is not fully charged, otherwise the braking energy is dissipated in braking resistors. When a train is motoring, auxiliary systems draw power from the power supply via conducting (third) rail while the tractive is supplied from a DC substation and from OBESS if

discharging criteria of the OBESS is reached. This means that the peak power of the power supply is compensated by the stored energy from the OBESD. The flowchart of the energy management model is shown in Fig. 5.

3.3 Charging algorithm

Charging algorithm starts by checking if a train is braking. Regenerative braking power (P_{reg}) is then calculated by Eq. (12) through Eq. (14), where η_{charge} , η_{motor} , η_{gear} , η_{inv} , η_{ESS} , $\eta_{chopper}$ and η_{ELDC} are charge, motor, gear, inverter, ESS, chopper and ELDC efficiencies, respectively. The braking energy that is stored in the OBESS (E_{ESS}) can be calculated by Eq. (15). It is important to note that the regenerative braking energy is not supplied back to a substation, when the OBESD is fully charged and there is no adjacent moving train, the regenerative energy is dissipated by the braking resistors. The flowchart of the charging algorithm is summarized in Fig. 6.

$$P_{reg} = P_{charge} = F_T \times v \times \eta_{charge}, \tag{12}$$

$$\eta_{charge} = \eta_{motor} \times \eta_{gear} \times \eta_{inv} \times \eta_{ESS}, \tag{13}$$

$$\eta_{ESS} = \eta_{chopper} \times \eta_{ELDC}, \tag{14}$$

$$E_{ESS}(t + \Delta t) = E_{ESS}(t) + P_{reg}\Delta t, \tag{15}$$

3.4 The discharging algorithm

Discharging algorithm starts by checking if a train is in acceleration mode. The tractive power during train motoring is supplied from a DC substation via conductor

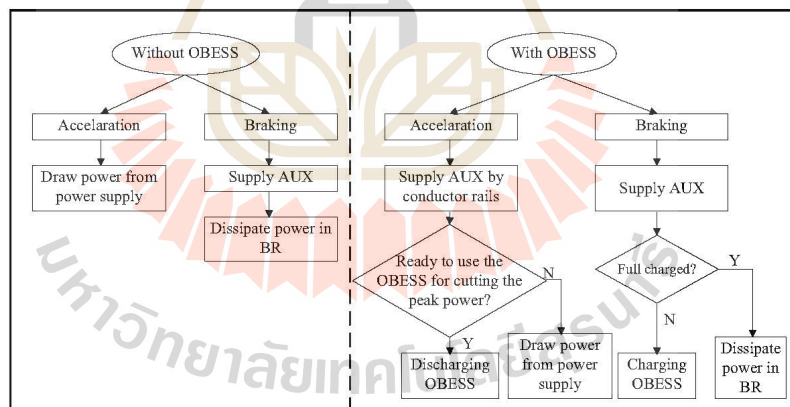


Fig. 5 Flowchart of the energy management model

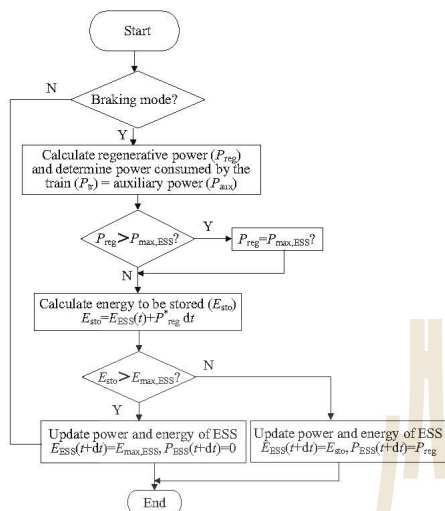


Fig. 6 Flowchart of the charge control for OBESS

rail and from OBESS if discharging criteria of the OBESS is reached. Power is drawn from the OBESS when its state of charge (SOC) is greater than the minimum limit and the required train power is more than the difference between the estimated peak power (P_{peak}) and the maximum allowable discharging power from the OBESS ($P_{dis,max}$), see Eq. (16). Flow chart of OBESS discharge control is shown in Fig. 7. The discharged power and energy of the OBESS (E_{ESS}) are calculated by Eqs. (17) and (18), respectively.

$$P_{tr} \geq P_{peak} - P_{dis,max}, \tag{16}$$

$$P_{dis}(t + \Delta t) = (P_{ta}(t + \Delta t) + P_{aux} - P_{start}) / \eta_{discharge}, \tag{17}$$

$$E_{ESS}(t + \Delta t) = E_{ESS}(t) - (P_{dis}(t + \Delta t) \times \Delta t). \tag{18}$$

4 Problem formulations for optimal energy saving

4.1 Objective function

The optimization objective of the paper is to maximize total saved energy at substations (ϕ), defined as in Eq. (19).

$$\text{Maximize } \phi = 1 - \left(\sum_{i=1}^{N_{TSS}} E_{sub,i}^{ess} / \sum_{i=1}^{N_{TSS}} E_{sub,i}^{noess} \right), \tag{19}$$

where $E_{sub,i}^{ess}$ and $E_{sub,i}^{noess}$ are the energy consumption at substation i with and without OBESS, respectively, and N_{TSS} is the number of traction substations.

4.2 Control parameters

The following control parameters are used to maximize the objective function: number of the OBESS modules (N_{ESS}), initial SOC of the OBESS (SOC_{start}), a gain of deceleration control (k_{dec}) and coasting point (L_{coast}). Trip time is controlled by k_{dec} and L_{coast} as presented in Fig. 8.

4.3 Constraints

The constraints of the optimization are given as follows:

Inequality constraints:

$$SOC_{limit}^{lower} \leq SOC \leq SOC_{limit}^{upper}, \tag{20}$$

$$N_{ESS}^{min} \leq N_{ESS} \leq N_{ESS}^{max}, \tag{21}$$

$$P_{ESS}^{min} \leq P_{ESS} \leq P_{ESS}^{max}, \tag{22}$$

$$k_{dec}^{min} \leq k_{dec} \leq k_{dec}^{max}, \tag{23}$$

$$L_{coast}^{min} \leq L_{coast} \leq L_{coast}^{max}. \tag{24}$$

where SOC_{limit}^{lower} and SOC_{limit}^{upper} are lower and upper limit of the SOC, N_{ESS}^{min} and N_{ESS}^{max} are minimum and maximum number of the OBESS modules, P_{ESS}^{min} and P_{ESS}^{max} are minimum and maximum power of the OBESS, k_{dec}^{min} and k_{dec}^{max} are minimum and maximum gain of the deceleration control, and L_{coast}^{min} and L_{coast}^{max} are minimum and maximum coasting point.

Equality constraint:

$$T_{trip} = T_{trip}^{nominal}, \tag{25}$$

$$SOC_{max} = SOC_{limit}^{upper}, \tag{26}$$

$$SOC_{end} = SOC_{start}, \tag{27}$$

where T_{trip} is the trip time, SOC_{max} and SOC_{end} are the maximum and final SOC of the OBESS, respectively.

In this paper, the genetic algorithm (GA) [25] has been implemented to find the optimal control parameters for maximizing the total energy saving of substations during the proposed journey. The flowchart of the simulator is summarized in Fig. 9.

5 Simulation results and discussion

5.1 Test system

The Silom Line of BTS Sky train used in this paper was the first mass transit line to commence service in Bangkok,

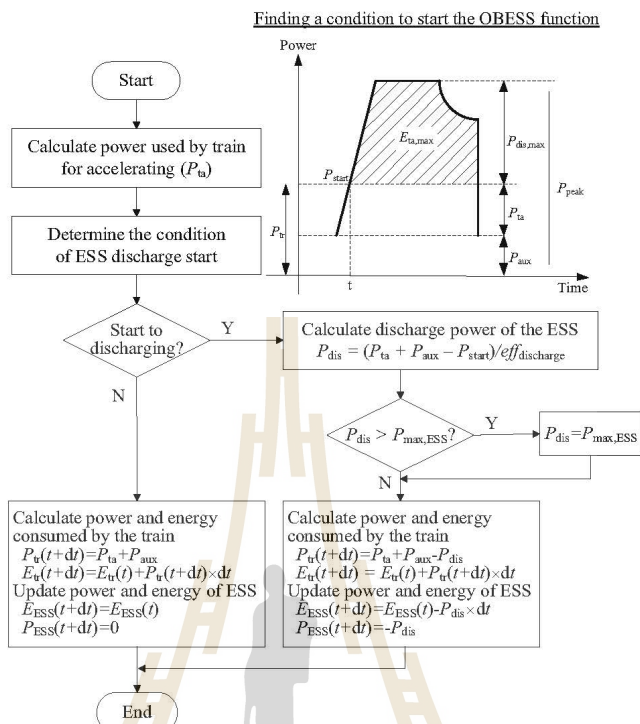


Fig. 7 Flowchart of the discharge control for OBESS

Thailand. The line has a service distance of 13.65 km, 13 service stations (W1-S12) and 7 DC traction substations as shown in Fig. 10 [16]. A train service starts from station W1 and terminates at station S12. The system parameters for simulation are listed in Table 1, and the simulation is done by MATLAB program on an Intel Core i5 2.53 GHz, 4.0 GB RAM computer. A train speed profile with the speed limit of the southbound train (Based case) is shown in Fig. 11. Three cases are considered in the simulation and compared to the base case (without OBESS) as shown in Table 2, and k_{dec} and L_{coast} are only considered when train speed is equal or greater than 60 km/h (from S6 to S12). The GA parameters used in the simulation are presented in Table 3. The SOC of the OBESS is maintained between 20% and 95% to maintain the life cycle of the OBESS.

From the simulation, optimal parameters are given in Table 4. It can be seen that the total number of modules and the initial SOC of the OBESS for both Case 1 and Case

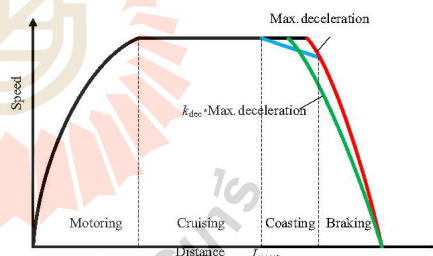


Fig. 8 Operating modes for the train

2 are 11 modules and 44.8%, respectively, whereas 10 modules and 40.9% of the initial SOC of the OBESS for Case 3 obtains the best fitness function. Maximum SOC of

Table 1 The system conditions for simulation

Specific data	Information	
<i>Train parameters</i>		
Voltage	Nominal voltage	750 V
Weight	Tare weight	153 ton
	Payload AW3	75 ton
Movement feature	Max. speed	80 km/h
	Max. acceleration	0.87 m/s ²
	Max. deceleration	1.00 m/s ²
Efficiency	Gear, motor, inverter	98%, 88%, 98%
	EDLC, chopper	86%, 95%
Auxiliary power	Constant load	270 kW
Train resistance	$A = 4025, B = 118.67, C = 0.871$	
<i>Power system parameters</i>		
Traction substation	No-load voltage rated power	790 V
		2550 kVA (CEN, S02, S05, S07)
		3300 kVA (S09, S11, S12)
Third rail and running rail	Third rail resistance	8.23 mΩ/km
	Running rail resistance	40.46 mΩ/km
	Conductivity to earth	0.1 S/km
<i>OBESS parameters</i>		
MITRAC energy saver [26]	Installed energy	1 kWh/module
	Max output power	300 kW/module
	Weight	428 kg/module

Table 2 Conditions of simulation in each case

Case	OBESS	Trip time control
Based	Without	Max. deceleration
1	With	$k_{dec} * \text{Max. deceleration}$
2	With	$L_{coast} + \text{Max. deceleration}$
3	With	$L_{coast} + k_{dec} * \text{Max. deceleration}$

Table 3 GA parameters

Parameters	Values
Control variables	
Number of the OBESS modules (N_{OBESS})	[8, 14]
Initial SOC of the OBESS (SOC_{start})	[20, 95]
Gain of deceleration control (k_{dec})	[0.8, 1]
Coasting point (L_{coast})	[200, 2000]
Generation	$Nvar \times 20$
Population	$Nvar \times 10$
Crossover probability	0.9
Mutation probability	0.1
Function tolerance	1×10^{-6}

* Nvar is the number of control variables

the OBESS and trip time for all cases are 95% and 1649 s, respectively.

Train speed profiles from station S6 to station S12 are shown in Fig. 12. Speed profiles for different cases are different according to the trip time control of each case. Figure 13 presents the OBESS operation, the state of charge is kept between 20% and 95%. The OBESS is recharged during train braking and discharged during train motoring. The discharge controls of the OBESS in all cases depend on train power demand and SOC of the OBESS. In the base case, train voltage drops rapidly from 790 to 620 V after leaving the first station whereas in other cases with OBESS voltage regulation is improved as shown in Fig. 14. Figure 15 presents train power profile for south-bound train direction, and the traction power of substations decreases as shown in Fig. 16 because the OBESS cuts peak power.

Considering the peak power cutting at the first traction substation (TSS1), the OBESS is unavailable because its SOC is lower than the appropriate level to start discharging. From the second substation (TSS2) and onwards, the OBESS is capable of supporting train acceleration power. In Table 5, the percentage of peak power reduction at TSS1 for Case 3 is less than other cases since the number of OBESS module and the initial SOC from GA optimization for Case 3 are different from Case 1 and Case 2, see Table 4. The trip time control only

Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak...

Table 4 Optimal parameters

Parameters	Case 1	Case 2	Case 3
N_{ESS}	11	11	10
$\text{SOC}_{\text{start}}$	44.8%	44.8%	40.9%
k_{dec}	$k_{\text{dec},7} = 0.80452$ $k_{\text{dec},8} = 0.84933$ $k_{\text{dec},9} = 0.85840$ $k_{\text{dec},10} = 0.92247$ $k_{\text{dec},11} = 0.83889$ $k_{\text{dec},12} = 0.86245$	–	$k_{\text{dec},7} = 0.95216$ $k_{\text{dec},8} = 0.94633$ $k_{\text{dec},9} = 0.99529$ $k_{\text{dec},10} = 0.97604$ $k_{\text{dec},11} = 0.98407$ $k_{\text{dec},12} = 0.97851$
L_{coast}	–	$L_{\text{coast},7} = 200.00$ $L_{\text{coast},8} = 202.89$ $L_{\text{coast},9} = 269.95$ $L_{\text{coast},10} = 200.68$ $L_{\text{coast},11} = 200.00$ $L_{\text{coast},12} = \text{N/A}$	$L_{\text{coast},7} = 304.72$ $L_{\text{coast},8} = 218.39$ $L_{\text{coast},9} = 280.00$ $L_{\text{coast},10} = 209.32$ $L_{\text{coast},11} = \text{N/A}$ $L_{\text{coast},12} = 200.00$
Fitness function (ϕ)	0.13715	0.15248	0.15564

N/A is no coasting

Table 5 The maximum peak power at TSS of each case

Case	P_{TSS1} (MW)	P_{TSS2} (MW)	P_{TSS3} (MW)	P_{TSS4} (MW)	P_{TSS5} (MW)	P_{TSS6} (MW)	P_{TSS7} (MW)
Based	3.04	2.00	2.23	2.19	2.18	2.16	2.48
1	1.74 [42.68]	0.73 [63.49]	1.75 [21.39]	1.31 [40.05]	1.45 [33.62]	1.56 [27.74]	1.22 [50.89]
2	1.74 [42.68]	0.73 [63.49]	1.75 [21.39]	1.31 [40.05]	1.47 [32.81]	1.59 [26.12]	1.22 [50.89]
3	1.95 [35.85]	0.73 [63.49]	1.75 [21.38]	1.31 [40.06]	1.48 [31.99]	1.56 [27.74]	1.22 [50.95]

[*] is the percentage deviation compared with the case that has no OBESS

Table 6 Performance index of the power supply network

Item (unit)	Based case	Case 1	Case 2	Case 3
Energy consumed by train (kWh)	298.95	260.90 [12.73]	256.08 [14.34]	255.13 [14.66]
Energy consumption at substation (kWh)	314.20	271.11 [13.71]	266.29 [15.25]	265.30 [15.56]
Energy losses (kWh)	15.25	10.20 [33.07]	10.21 [33.03]	10.16 [33.34]
Regenerated energy available (kWh)	87.55	72.15 [17.58]	66.94 [23.54]	66.29 [24.28]
Energy wasted in brake resistor (kWh)	71.13	0.33 [99.54]	0.63 [99.12]	0.12 [99.83]
Recovery coefficient (%)	–	59.72	71.58	73.76

[*] is the percentage deviation compared with the case that has no OBESS

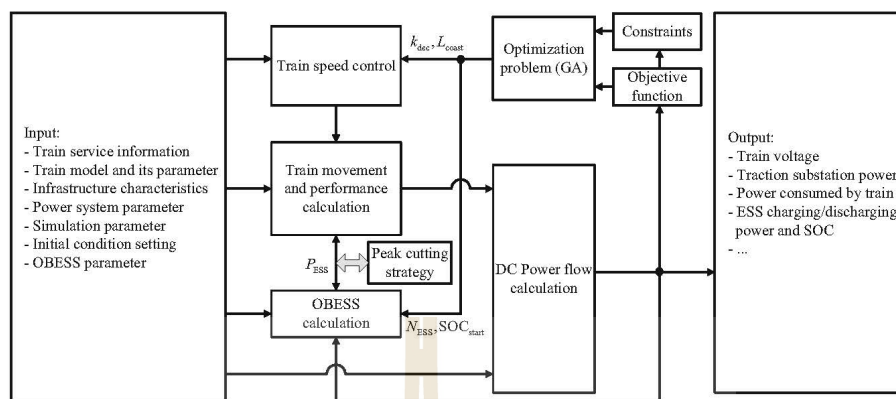


Fig. 9 Optimization of the OBESS operation and speed profile to maximize total saved energy at substations

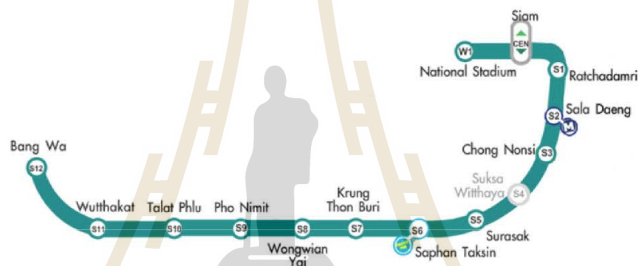


Fig. 10 BTS Sky train Silom Line, Bangkok, Thailand

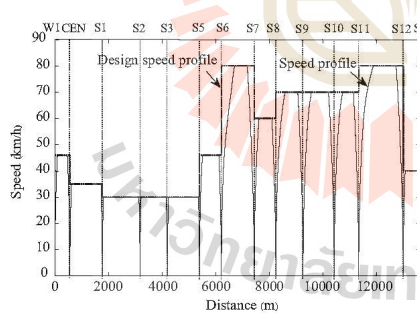


Fig. 11 Train speed profile of southbound direction (base case)

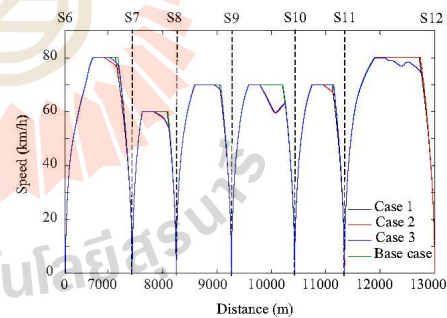


Fig. 12 Optimal train speed profile (S6-S12) of each case

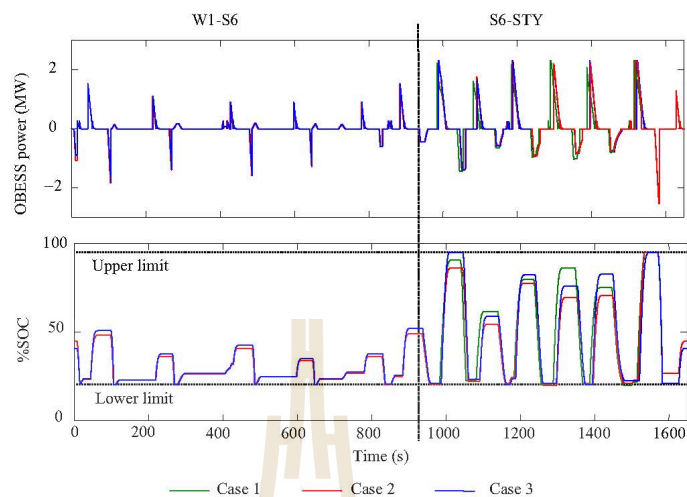


Fig. 13 ESS power and %SOC

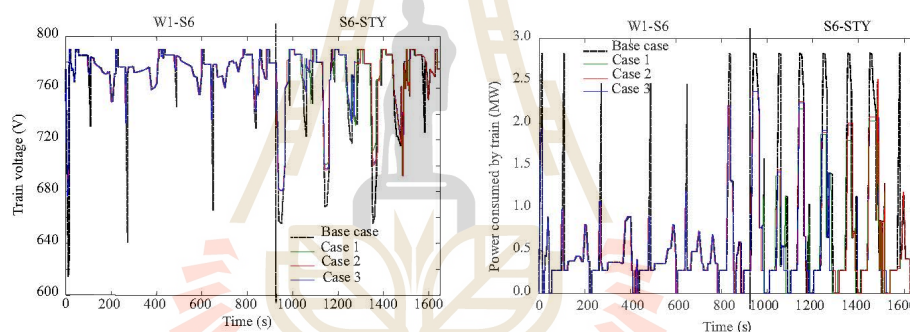


Fig. 14 Train voltage profile

Fig. 15 Power consumed by train

affects the peak power at TSS5, TSS6 and TSS7 accordingly, and the peak powers of all cases are very close to one another. With the proposed peak cutting algorithm, a 63.49% maximum peak power reduction is achieved at TSS2 (from 2 to 0.73 MW).

The simulation is based on a single train travelling a single journey in the southbound direction of each case compared with the base case (with no OBESS) as shown in Table 6. Regarding the energy saving, the total energy drawn by a train is saved by 12.73%, 14.34% and 14.66% in Case 1, Case 2 and Case 3, respectively. This reveals

that the motive energy saving is affected by the initial SOC of the OBESS. The total energy consumed by the traction substation is saved by 13.71%, 15.25% and 15.56% in Case 1, Case 2 and Case 3, respectively. The net energy losses for each case are the same, which is 10 kWh, that is 33% reduction from the base case. Available regenerative braking energy is the energy generated from the train braking (not energy supplied to the auxiliary systems or the OBESS), it can be seen that Case 3 has the highest available regenerative braking energy. The dissipated energy by the electric braking resistor is saved by 99.54%, 99.12%

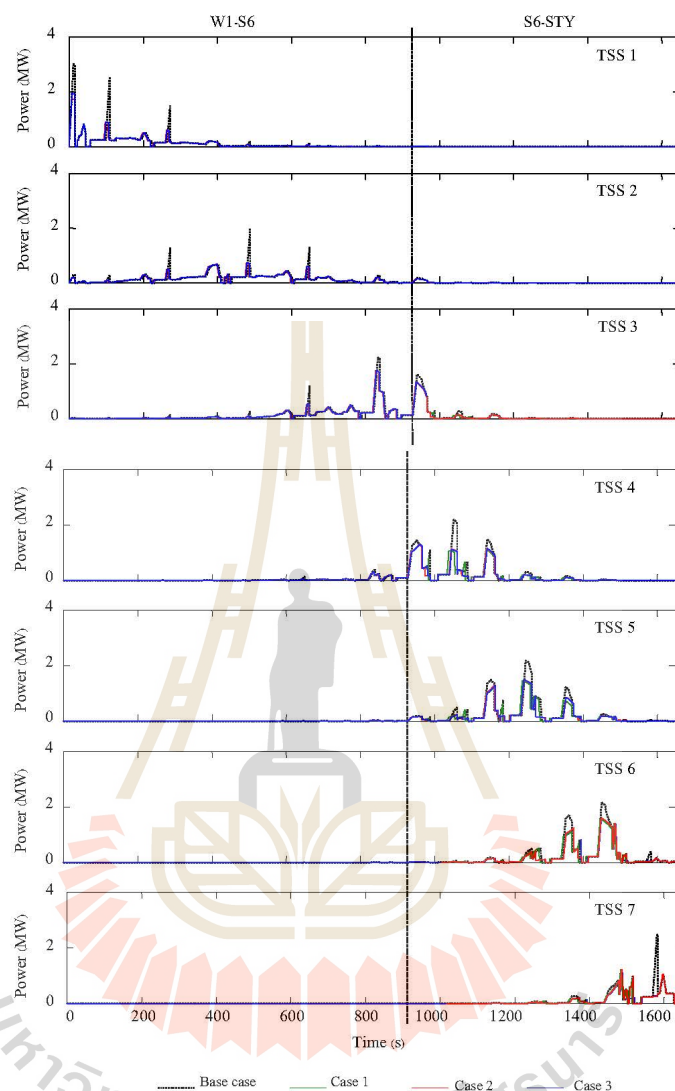


Fig. 16 Traction substation power at TSS

and 99.83% in Case 1, Case 2 and Case 3, respectively. The recovery coefficient proposed in this paper is the proportion between the total energy savings measured at

substations and the regenerated braking energy produced by a train; Case 3 achieves recovery coefficient of 73.76% which is the highest.

6 Conclusion

This paper presents a study on optimal energy saving in DC-electrified railway system by using OBESS. Substation peak power reduction and evaluating power supply network performance achieved by using peak demand cutting strategy are the objectives of the study. Criteria for OBESS design, regenerative braking energy management strategy and trip time control are proposed. Track model used in the simulation is based on data from Bangkok Transit System (BTS)-Sky - train Silom Line in Thailand. The proposed system is thus effectively compared with the present system (base case) that uses no OBESS. A 15.56% of the energy saving at the traction substation is achieved by the proposed strategy, peak power is reduced by 63.49% at TSS2, and the number of OBESS modules can also be reduced by controlling the trip time of the coasting motion together with the deceleration control (Case 3). The initial SOC of the OBESS has a huge effect on peak power cutting only at the first traction substation.

Open Access This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

References

- Kulworawanichpong T (2015) Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method. *J Mod Transp* 23(4):241–251. doi:10.1007/s40534-015-0086-y
- Khayyam S, Lakhdar H, Ponci F, Monti A (2015) Agent based energy management in railways. In: Proceedings of international conference on electrical systems for aircraft, railway, ship propulsion and road vehicles (ESARS), pp 1–6. doi:10.1109/ESARS.2015.7101445
- Sheu JW, Lin WS (2012) Energy-saving automatic train regulation using dual heuristic programming. *IEEE Trans Veh Technol* 61(4):1503–1514. doi:10.1109/TVT.2012.2187225
- Wang W, Cheng M, Wang Y, Zhang B, Zhu Y, Ding S, Chen W (2014) A novel energy management strategy of onboard supercapacitor for subway applications with permanent-magnet traction system. *IEEE Trans Veh Technol* 63(6):2578–2588. doi:10.1109/TVT.2013.2293707
- Xu G, Li W, Xu K, Song Z (2011) An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles. *Energies* 4(9):1461–1477. doi:10.3390/en4091461
- Gonzalez-Gil A, Palacin R, Batty P, Powell JP (2014) Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy. In: Proceedings of international conference transport research arena: transport solutions from research to deployment, pp 1–9
- Dominguez M, Fernández-Cardador A, Cuceala AP, Pecharrromán RR (2012) Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 9(3):496–504. doi:10.1109/TASE.2012.2201148
- Miyatake M, Ko H (2010) Optimization of train speed profile for minimum energy consumption. *IEEE Trans Electr Electron Eng* 5(3):263–269. doi:10.1002/tee.20528
- Shen XJ, Chen S, Li G, Zhang Y (2013) Configure methodology of onboard supercapacitor array for recycling regenerative braking energy of URT vehicles. *IEEE Trans Ind Appl* 49(4):1678–1686. doi:10.1109/TIA.2013.2257976
- Battistelli L, Ciccarelli F, Lauria D, Proto D (2009) Optimal design of DC electrified railway stationary storage system. In: Proceedings of international conference on clean electrical power, pp 739–745. doi:10.1109/ICCEP.2009.5211971
- Jung B, Kim H, Kang H, Lee H (2014) Development of a novel charging algorithm for on-board ESS in DC train through weight modification. *J Electr Eng Technol* 9(6):1795–1804. doi:10.5370/JEET.2014.9.6.1795
- Iannuzzi D, Tricoli P (2010) Optimal control strategy of onboard supercapacitor storage system for light railway vehicles. In: Proceedings of IEEE international symposium on industrial electronics, pp 280–285. doi:10.1109/ISIE.2010.5637559
- Grigans L, Laikovskis L (2010) Study of control strategies for energy storage system on board of urban electric vehicles. In: Proceedings of 14th international power electronics and motion control conference, pp T9-34-T9-38. doi:10.1109/EPEPEMC.2010.5606856
- Xia H, Yang Z, Lin F, Chen H (2015) Modeling and state of charge-based energy management strategy of ultracapacitor energy storage system of urban rail transit. In: Proceedings of 41st annual conference of the IEEE industrial electronics society, pp 002083–002087. doi:10.1109/IECON.2015.7392408
- Talla J, Streit L, Peroutka Z, Drabek P, Blahnik V (2015) Fuzzy energy management strategy for tram with supercapacitors. In: Proceedings of 41st annual conference of the IEEE industrial electronics society, pp 003963–003968. doi:10.1109/IECON.2015.7392718
- Sumpavakup C, Kulworawanichpong T (2015) Multi-train movement simulation using MATLAB object-oriented programming. *Appl Mech Mater* 763:153–158. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.763.153
- Kulworawanichpong T (2004) Optimising AC electric railway power flows with power electronic control. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK
- Lu S (2011) Optimising power management strategies for railway traction. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK
- Nash A, Huerlimann D (2003) OPENTRACK-Simulation of railway networks, user manual version 1.3. Institute for Transportation Planning and Systems, ETH Zurich, Switzerland
- Rochard BP, Schmid F (2000) A review of methods to measure and calculate train resistances. *Proc IMechE Part F J Rail Rapid Transit* 214(4):185–199. doi:10.1243/0954409001531306
- Lee HM, Jeon EJ, Jeong SC (2010) A study on calculation of DC railway loadflow with energy storage system. In: Proceedings of international conference on control, automation and systems, pp 800–803. doi:10.1109/ICCAS.2010.5670179
- Masamichi O (2010) Onboard storage in Japanese electrified lines. In: Proceedings of international conference power electronics and motion control, pp 9–16. doi:10.1109/EPEPEMC.2010.5606559
- Vazquez S, Lukic SM, Galvan E, Franquelo LG, Carrasco JM (2011) Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Trans Ind Electron* 57(12):3881–3895. doi:10.1109/TIE.2010.2076414
- Ratniyomchai T, Hillmansen S, Tricoli P (2014) Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *IET Electr Syst Transp* 4(1):9–20. doi:10.1049/iet-est.2013.0031
- Goldberg DE, Edward D (1989) Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, 1st edn. Addison-Wesley, Massachusetts
- Bombardier Inc. (2009) EcoActive Technology-MITRAC Energy Saver. datasheet, Zurich, Switzerland

Applied Mechanics and Materials Vol. 763 (2015) pp 153-158
 © (2015) Trans Tech Publications, Switzerland
 doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.763.153

Multi-Train Movement Simulation Using MATLAB Object-Oriented Programming

Chaiyut Sumpavakup^a, Thanatchai Kulworawanichpong^b

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
 Nakhon Ratchasima, THAILAND

^ac.sumpavakup@gmail.com, ^bthanatchai@gmail.com

Keywords: Multi-train simulation, Train movement calculation, Object-oriented programming.

Abstract. This paper is to demonstrate the use of MATLAB Object-Oriented Programming (OOP) for developing Multi-Train Movement Simulation (MTMS). Dynamic performance of the train movement is modeled with the help of Newton's law of motion. Train movement in this work is based on a sequence of four operating modes: i) accelerating mode, ii) constant speed or cruising mode, iii) coasting mode and iv) braking mode. The design concept of a train movement class is described with its properties and methods. To evaluate its use, the proposed train movement simulator developed here is tested against Bangkok Transit System (BTS) – Sky Train Silom Line. This system has the service distance of 13-km and is fed by seven 750-V DC power sources through its 3rd rail. The results showed the effectiveness of the proposed simulator.

Introduction

Train speed profiles are extensively used in railway operation and research applications, such as train performance calculation, journey time estimation, energy consumption evaluation, capacity analysis, train scheduling, new route planning, old route upgrading, etc. During the trip from its start station to end station, by alternating powering, constant speed, coasting, and braking modes. The movement of a train is very complex and governed by many factors. As a result, a precise and reasonable speed profile cannot be easily obtained from analytical approaches [1]. A modern approach is to build up a train performance simulator to perform such computations [2].

Although many computer models have been developed and some of them become commercial software, their computation algorithms are not clearly revealed into the public domain due to business secrets. Especially, they may not take practical rules into considerations and thus, are difficult to apply to specific railway systems. For these reasons, a train performance simulator is developed in this study using Object-Oriented Programming (OOP) concepts with MATLAB.

This paper consists of five sections. Section two illustrates a basic of multi-train simulation. OOP is described in Section three. Section four gives simulation results and discussions. Lastly, conclusion is in Section five.

Multi-train Simulation

Train movement calculations are based on the well-known equations of motion, taking account of gradients, speed restriction, mode of operation, etc [2]. The net force applied to accelerate a train is $F = M_{eff}\alpha$, where F is the net force, M_{eff} is the effective mass and α is the train acceleration. In this section, the basic modules within the multi-train simulation are briefly reviewed.

Train movement calculation. The train motion is opposed by various forces, e.g. train resistance, track gradient force, etc. By applying Newton's second law, the train movement equation is expressed in (1).

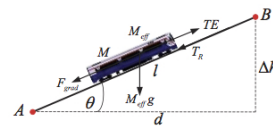


Fig.1 Resolution of mass force on a gradient

$$F = TE - F_{grad} - T_R = M_{eff} \alpha \quad (1)$$

Where TE is the tractive effort (N), F_{grad} is the gradient force (N), T_R is the train resistance (N), M_{eff} is the effective mass (kg) and α is the train acceleration (m/s^2) which will be positive for uphill running, negative for downhill running and zero for flat track running.

1) **Tractive effort (TE):** The force which a locomotive can exert when pulling a train is called tractive effort [5]. In order to use this information easily in calculations of acceleration and deceleration, it is helpful to develop an approximation which covers the speed range of interest.

2) **Gradient force (F_{grad}):** To push a heavy train up slopes requires substantial force. Gradients on railways are small, see Fig. 3, and usually expressed in the form of $\Delta h/l$, where Δh is the vertical distance, l is the slope length or horizontal distance from point A to B, see Fig. 1. With a small arbitrary angle θ the gradient force can be approximated by using (2).

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta = \frac{M_{eff} g \Delta h}{l} \quad (2)$$

3) **Train resistance (T_R):** The motion of the train is opposed by a number of resistive forces. The overall resistance on level track can be formulated as follows [6]:

$$T_R = A + Bv + Cv^2 \quad (3)$$

Where v is the vehicle speed (km/h) and the coefficients A (kN), B (kNh/km) and C (kNh^2/km^2) are all constants, referred as the Davis coefficients [7].

4) **Effective mass (M_{eff}):** The rotational inertia of the rotating components on the train must be taken into account in order to properly calculate the acceleration of the train. This is usually done by adding a rotary allowance term to the mass of the train. This is expressed as a fraction of the tare mass of the train which is the mass of train without loads or passengers [6].

$$M_{eff} = M_t (1 + \lambda_w) + M_l \quad (4)$$

Where M_t is the tare mass, λ_w is the rotary allowance and M_l is the freight or passenger load
Speed control strategy. The speed control model determines the modes of operation. Typically, there are four operating modes for the train: i) Accelerating mode, ii) Constant speed mode, iii) Coasting mode and iv) Braking mode [4,8], see Fig. 2. The tractive effort provided is dependent on the speed control strategy applied.

Power consumed by a train. The power consumed by a train corresponding to tractive effort TE and instantaneous speed v is given by the following expression [4].

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (6)$$

Where η denotes the efficiency of conversion of electrical input power to the mechanical output power at the wheels.

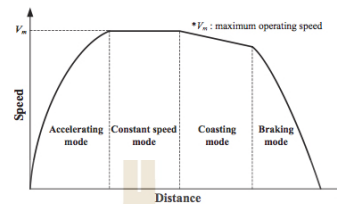


Fig.2 Operating modes for the train

Speed and position update. Once the train acceleration is obtained, speed and position of the train is calculated by the following equations,

$$v_t = v_i + \alpha \Delta t \quad (7)$$

$$s_t = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (8)$$

Where v_t and v_i are the terminal and initial speed, Δt is the time step, 0.1 s in this paper, s_t and s_i are the position after and before updated

Summary of train movement calculation. The train movement calculation can be summarized as follows.

- Use the speed from the previous time update to evaluate the tractive effort (Section B.) and thus the power consumption (Equation (6)).
- Determine the gradient force, train resistance, etc and then compute the train acceleration (Equations (1) - (4))
- Update the train speed and position (Section D.)

OOP-Based Multi-Train Simulation

Nowadays, computers are used extensively for solving several engineering problems. To solve such problems, a sequence of instructions is communicated to the computer and some efficient programming languages are needed. The instructions written in a programming language form a program. A group of programs developed for a certain specific purpose is referred to as software. Software can be system software or application software. In this work, only Application software is related. It is a collection of pre-written programs working for some specific applications. Roughly speaking, programming techniques can be categorized into 4 techniques: i) Unstructured programming, ii) procedural programming, iii) modular programming and iv) object-oriented programming.

Object-oriented programming solves some of the problems just mentioned. In contrast to the other techniques, this technique is a web of interacting objects having its own state. In OOP, any program would have as many list objects as needed. Instead of calling a procedure which must be provided with the correct list handle, each program would directly send a message to the list object. When any object is called, it can perform its own tasks automatically and simultaneously [9]. In this paper, only OOP is used to develop a train movement simulator.

OOP Concepts. The object-oriented approach to programming is an easy way to master the management and complexity in developing software systems that take advantage of the strengths of data abstraction. An object defines the following three properties: i) state, ii) behavior and iii) identify. Interaction between objects and their properties can be derived from a "class". Class in OOP is a template consisting of variables and functions. In MATLAB, variables and functions are called "Properties" and "Methods" respectively as shown in Fig. 3.

OOP in MATLAB. There exist several programming languages to develop an OOP software, e.g. Visual Basic, Java, C++ or MATLAB. MATLAB has equipped with a feature of OOP since the version 7.6 (R2008a) released. Fig. 4, is a formal form to define “class” in MATLAB OOP.

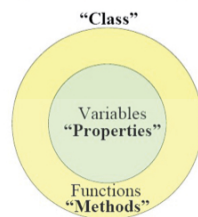


Fig.3 The component of the class

```

classdef ClassName
    properties
        PropertyName1;
        PropertyName2;
        ...
    end
    methods
        function obj = ClassName()
            ...
        end
        function MethodName1
            ...
        end
        ...
    end
end

```

Fig.4 The formal form of the class in MATLAB OOP

OOP-Based Multi-Train Movement Simulator

Design concept of OOP-based multi-train movement simulator is to create a class called by “train” up to this class to simulate the movement of the train. Structure of train class for simulation as shown in Fig. 5 which consisting of Properties: i) Train parameters (weight conditions, movement features, efficiencies, tractive effort and braking effort diagram, train resistance formula) ii) Movement parameters (operational conditions alignment data, headway, dwell times, gradient profile) iii) Operation modes of train (see. Section II) iv) State variable of train (speed, position, acceleration, deceleration, tractive effort) and Methods: i) Initial parameter setting for simulation ii) Calculates train movement on up-track and down-track. The procedure of OOP-based multi-train movement simulator began by define initial configuration for calculating: i) Initial state variables setting ii) The system conditions for simulation and iii) Train characteristics. And then calculate the train movement with the conditions of test system by calculates all train together at the time t and repeat until t equal to simulated time (t_{run}). From flow diagram to see that when we write OOP will make to the procedure programming is an easy. To change the conditions of the test system is very simple without about calculate the movement of the train.

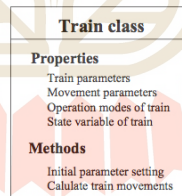


Fig.5 Structure of train class for simulation

Simulation and Results

In this section, The Silom Line of BTS SkyTrain system was modeled for the simulation tests [10]. The BTS SkyTrain was the first electric mass transit railway system to commence operations in Thailand. The BTS Silom Line is composed of 13 stations and 7 traction substations as shown in

Fig.6. In this paper, defined as numbers of train are 28 trains, dwell time and headway is 20 and 120 seconds respectively.

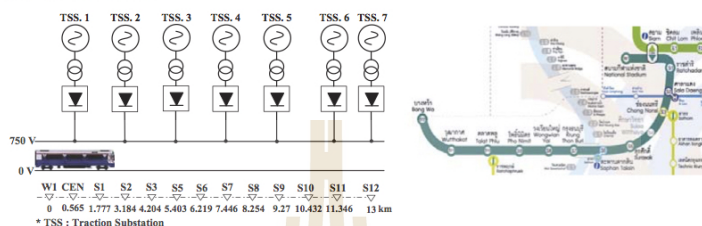
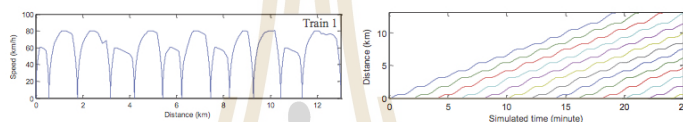


Fig.6 BTS Silom Line



a) Speed-distance trajectory b) Train positions against time curve
 Fig.7 Speed-distance trajectory and train positions against time curve on up-track

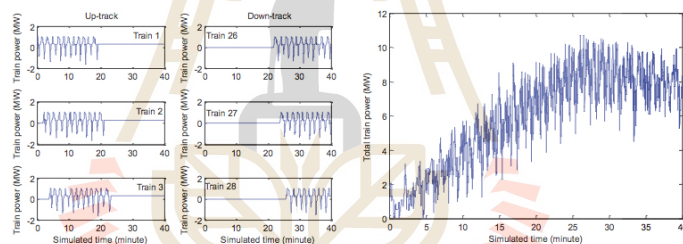


Fig.8 Train positions against time curve Fig.9 Real power variations for selected trains

Fig. 7 a) showed the speed-distance trajectory of train number 1 on up-track. To see that the train speed profile is changed forever of operating mode depending on the gradient profile. Fig. 7 b) showed the train positions against time curve on up-track and down-track. The real power variations for selected trains on up-track and down-track as shown in Fig. 8, to see that both up-track and down-track are maximum real power is about 1.5 MW and minimum real power is about -1.8 MW. Fig. 9 showed the total train power consumption to see that the overall power of the train used to be quite a lot of the swing. Depending on the density of the train that ran on track by train schedule which the maximum of about 11.5 MW. The results will be seen that this simulator can simulate the multi-train movement, great flexibility to change the conditions of the system to be tested has several parts without to edit or modify the main program or train class anyhow.

Acknowledgment

I would like to express my sincere gratitude to the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. Program (Grant No. PHD/0038/2556) for supporting this research to Chaiyut Sumpavakup and Thanatchai Kulworawanichpong

Conclusion

This paper is to demonstrate the use of MATLAB Object-Oriented Programming (OOP) for developing Multi-Train Movement Simulation (MTMS). The design concept of a train movement class is described with its properties and methods. To evaluate its use, the proposed train movement simulator developed here is tested against Bangkok Transit System (BTS) – Sky Train Silom Line. The results demonstrate that the proposed simulator is efficient, and very useful and flexible for train operation research and applications.

References

- [1] J.C. Jong and S. Chang, "Algorithms for generating train speed profiles" *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6 (2005), p. 356 - 371
- [2] C.J. Goodman, "Train performance and simulation", Fourth Vocation School on Electric Traction Systems, IEE Power Division, April (1997)
- [3] L.K. Sui, "An object-oriented railway system and power network simulator", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, April (1995)
- [4] T. Kulworawanichpong, "Optimising AC electric railway power flows with power electronic control", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November (2003)
- [5] Applications of Mathematics, "Tractive effort, acceleration and braking", The Mathematical Association (2004) (www.m-a.org.uk)
- [6] S. Lu, "Optimising power management strategies for railway traction", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, October (2011)
- [7] B. P. Rochard and F. Schmid, "A review of methods to measure and calculate train resistances," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 214, No. 4 (2000), p. 185–199
- [8] K. Kim, "Optimal train control on various track alignments considering speed and schedule adherence constraints", PhD Thesis, New Jersey Institute of Technology, USA, January (2010)
- [9] The Mathworks Inc., Object-Oriented Programming (2014) (www.mathworks.com)
- [10] The Bangkok Mass Transit System PCL., BTS Sky train system (2012) (www.bts.co.th)



การหาลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟที่เหมาะสมที่สุดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
โดยใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน

OPTIMIZING TRAIN SPEED PROFILE FOR A MASS TRANSIT SYSTEM USING DIFFERENTIAL
EVOLUTION

ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์¹ และธันตชัย กุลวรวานิชพงษ์¹
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวางแผนการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนระหว่างสถานีโดยมีเป้าหมายให้ใช้พลังงานน้อยที่สุด การทำงานของรถไฟที่นำมาใช้มีทั้งหมด 4 โหมดตามลำดับ คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการแล่น และโหมดการเบรก ปัญหาที่นำเสนอเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของลักษณะสมบัติความเร็วของรถไฟโดยการควบคุมผ่านตัวแปร 3 ตัว คือ อัตราเร่ง ในโหมดการเร่ง อัตราหนึ่งในโหมดการเบรก และตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น เพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถไฟใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมน้อยที่สุด การแก้ปัญหาใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน (Differential Evolution: DE) เปรียบเทียบผลเฉลยและประสิทธิภาพ ในการค้นหาค่าตอบกับวิธีเชิงปัญญาประดิษฐ์ 2 วิธี คือ วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA) และวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ระบบทดสอบที่นำมาใช้เป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ระยะทางระหว่างสถานีมีค่าเท่ากับ 2 กิโลเมตร กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ไว้ที่ 80 และ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากการจำลองผลพบว่า การควบคุมการทำงานของรถไฟอย่างเหมาะสมด้วยวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน สามารถช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยรวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟได้เป็นอย่างดี และมีประสิทธิภาพกว่าวิธีอื่น ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน คำสำคัญ: ลักษณะสมบัติความเร็วของรถไฟ, ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, ดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน

ABSTRACT

This paper presents a movement planning of a mass transit section between two-passenger stopping stations with the goal to minimize total energy consumption during the journey. Train movement in this work is based on a sequence of four mode operations: i) accelerating mode, ii) constant speed or cruising mode, iii) coasting mode and iv) braking mode. The presented problem is one of optimization problems in which train speed profile is optimized by controlling three parameters: i) acceleration rate ii) deceleration rate and iii) location of coasting point. To achieve this goal the overall energy consumption of the proposed journey is minimized. This paper described the use of Differential Evolution as a potential tool to solve the problem and compared to some well-known and efficient intelligent search techniques (Genetics Algorithm: GA and Particle Swarm Optimization: PSO). The test system used in this work is a simple mass transit section between two-passenger stopping stations with the service distance of 2 km and the maximum speed limit of 60 km/h and 80 km/h. The results showed that solving such a problem by using DE can considerably reduce the overall energy consumption and efficient than other methods under the same conditions.

KEYWORDS: Train Speed Profile, Mass Transit System, Differential Evolution

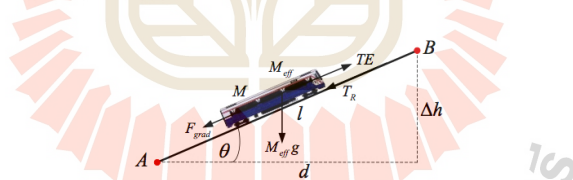
1. บทนำ

การประหยัดพลังงานในระบบรถไฟฟ้ามหานครมีการศึกษามากมาย มีวิธีที่ช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้หลากหลายวิธี เช่น กลยุทธ์ในการขับรถไฟตามข้อมูลความเร็วของรถไฟที่เหมาะสมที่สุด [1] การใช้พลังงานคืนกลับจากการเบรกมาจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนเพื่อช่วยลดกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายจากแหล่งจ่ายภายนอก และการใช้ระบบเก็บสะสมพลังงาน เป็นต้น การเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยในการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยควบคุมการทำงานของรถไฟฟ้ามหานครแบ่งเป็น 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการแล่น และโหมดการเบรก [2,3] แต่การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่มีความซับซ้อนและมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จึงไม่สามารถทำได้ง่ายตายตัว [4] ซึ่งที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลากหลายในประเด็นดังกล่าว เช่น การลดพลังงานโดยใช้ระบบควบคุมการแล่นแบบไดนามิก (dynamic coast control) ในรถไฟขนส่งมวลชน [5] การลดกำลังไฟฟ้าค่ายอดและการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้ามหานครขนส่งมวลชนโดยการควบคุมเวลาการวิ่งของรถไฟ [6] วิธีการเดินรถไฟประหยัดพลังงานสำหรับรถไฟฟ้ามหานคร [7] เป็นต้น ส่วนงานวิจัยที่นำวิธีเชิงปัญญาประดิษฐ์มาใช้กับประเด็นดังกล่าว เช่น การเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยการควบคุมการแล่นโดยใช้วิธีจินเนติกอัลกอริทึม [8,9] เป็นต้น

บทความนี้ นำเสนอการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุด โดยควบคุมการทำงานผ่านตัวแปร 3 ตัว คือ อัตราเร่งในโหมดการเร่ง (α_{acc}) อัตราเร่งในโหมดการเบรก (α_{dec}) และตำแหน่งเริ่มโหมดการแล่น (L_{coast}) เพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมน้อยที่สุด ด้วยวิธีดัดเฟรมเชลล์โวลูชัน ในส่วนแรกขอบทความกล่าวถึงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานคร ส่วนที่สองแสดงรายละเอียดการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดัดเฟรมเชลล์โวลูชัน ส่วนที่สามแสดงรายละเอียดการทดสอบและผลการทดสอบ ส่วนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์และสรุปผล

2. แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานคร

การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครแสดงดังรูปที่ 1 มีแรงที่ต้องนำมาพิจารณา ดังนี้ คือ แรงจุดขบวนรถไฟ (tractive effort) แรงเกรเดียนต์ (gradient force) ความต้านทานของรถไฟ (train resistance) ดังนั้นสมการพื้นฐานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครพิจารณาด้วยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ดังสมการที่ (1) โดยที่ M_{eff} คือ ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟ (effective vehicle mass; kg) TE คือ แรงจุดขบวนรถไฟ (tractive effort; N) T_R คือ ความต้านทานของรถไฟ (train resistance, N) F_{grad} คือ แรงเกรเดียนต์ (gradient force, N) และ α คือ ความเร่งของรถไฟ (train acceleration; m/s^2) ซึ่งจะมีค่าเป็นลบสำหรับทางขึ้นเนินและมีค่าเป็นลบสำหรับทางลงเนิน



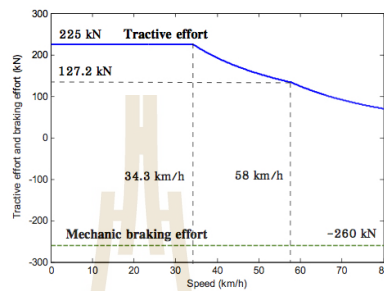
รูปที่ 1 แผนภาพการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ

$$F = TE - F_{grad} - T_R = M_{eff} \alpha \tag{1}$$

2.1 แรงจุดและแรงเบรกขบวนรถไฟ

แรงขับเคลื่อนรถไฟหรือแรงจุดขบวนรถไฟได้จากมอเตอร์ลากจูงขับเคลื่อนผ่านเพลาของมอเตอร์ซึ่งนำมาขับเคลื่อนล้อของรถไฟ ค่าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยโดยเฉพาะที่สำคัญ ได้แก่ น้ำหนักและความเร็วของรถไฟ [10] ผู้ผลิตรถไฟจะทำการทดสอบและนำเสนอในรูปแบบของแรงจุดขบวนรถไฟเทียบกับความเร็วของรถไฟ คุณลักษณะโดยทั่วไปของแรงจุดขบวนรถไฟแสดงดังรูป

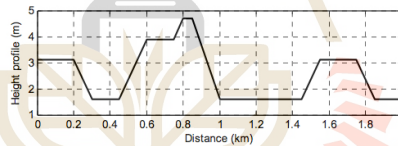
ที่ 2 ส่วนแรงเบรกขบวนรถไฟที่จะได้มาจากการทดสอบของผู้ผลิตรถไฟฟ้าเช่นกันขึ้นอยู่กับใช้เบรกทางกล (mechanical brake) หรือเบรกทางไฟฟ้า (electrical brake)



รูปที่ 2 คุณลักษณะแรงจุดและแรงเบรกขบวนรถไฟฟ้า

2.2 แรงเกรเดียนต์

การลากรถไฟฟ้าซึ่งมีน้ำหนักมากขึ้นนั้นต้องใช้แรงลากอย่างมาก โดยทั่วไปเส้นทางการเดินทางรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระดับเกรเดียนต์หรือความชันจะน้อย และจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความชันบ่อย [11] ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 และมักแสดงในรูปของ ซึ่ง คือ ระยะในแนวตั้ง / คือ ระยะความชันหรือระยะในแนวระนาบจากจุด A ไปยังจุด B แสดงดังรูปที่ 1 แรงเกรเดียนต์หรือแรงเนื่องจากความลาดเอียงของการเคลื่อนที่ สามารถหาได้ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 3 Gradient profile

$$F_{grad} = M_{eff} g \sin \theta = \frac{M_{eff} g}{h} \Delta h \quad (2)$$

2.3 แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจะมีแรงต้านซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อกับรางและแรงต้านอากาศ เรียกโดยรวมนว่า แรงต้านการเคลื่อนที่ (resistance force) ค่าความต้านทานโดยรวมของรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [11]

$$T_R = A + Bv + Cv^2 \quad (3)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของรถไฟ (km/h) และ A (kN), B (kNh/km) และ C (kNh²/km²) คือ สัมประสิทธิ์เดวิส (Davis coefficients) ซึ่งทุกตัวเป็นค่าคงที่ [12]

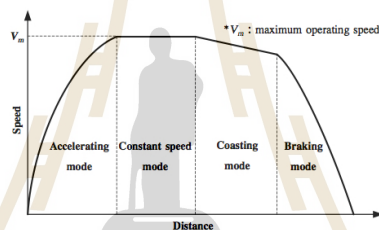
2.4 ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟ

ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟสามารถหาได้จากสมการที่ (4) [11] โดยที่ M_t คือ น้ำหนักเปล่า (tare weight) และ λ_w คือ ตัวประกอบน้ำหนักผู้โดยสาร (passenger mass factor)

$$M_{off} = M_t (1 + \lambda_w) \quad (4)$$

2.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟ

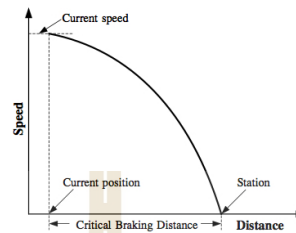
รูปแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟจะพิจารณาจากโหมดการทำงานของรถไฟ โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง (accelerating mode) โหมดความเร็วคงที่ (constant speed mode) โหมดการแล่น (coasting mode) และโหมดการเบรก (braking mode) [3,13] ดังรูปที่ 4 โดยแรงจุดขบวนรถไฟในแต่ละโหมดขึ้นอยู่กับเทคนิคการควบคุมที่ใช้



รูปที่ 4 โหมดการทำงานของรถไฟ

โหมดการเร่งจะเร่งความเร็วจากสถานี่ด้วยความเร็วที่กำหนดจนถึงความเร็วทำงาน (service speed) โดยค่าความเร่งของรถไฟจะมีค่าเป็นบวก (α_{acc}) และแรงจุดขบวนรถไฟสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) เมื่อความเร็วของรถไฟถึงความเร็วทำงานก็จะเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่ โหมดนี้จะรักษาความเร็วไว้ที่ความเร็วทำงาน ($\alpha = 0$) จนกระทั่งถึงตำแหน่งเริ่มโหมดการแล่น (L_{coast}) เมื่อถึงโหมดการแล่น โหมดนี้แรงจุดขบวนรถไฟจะมีค่าเป็นศูนย์ ($TE = 0$) และค่าความเร่งจะมีค่าเป็นลบ แต่อย่างไรก็ตามความเร่งสามารถมีค่าเป็นบวกได้ในกรณีที่มีลมพัดขึ้น และจะเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรกก็ต่อเมื่อถึงความเร็วที่ต้องเบรกด้วยความเร่งเป็นลบ (α_{dec}) หรือถึงระยะที่จะต้องเบรก โหมดความเร็วจึงหาระยะที่จะต้องเบรก (Critical Braking Distance: CBD) เพื่อจะเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 5 โดยค่า CBD สามารถหาได้จากสมการที่ (5) [11]

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha_{dec}} \quad (5)$$



รูปที่ 5 การควบคุมการทำงานโหมดเบรก

2.6 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟขึ้นอยู่กับแรงดุดขบวนรถไฟ ความเร็วของรถไฟและประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (7) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) [3]

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (6)$$

2.7 การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่

การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ โดยที่ v_i และ v_f คือ ความเร็วรถไฟที่หลังและก่อนปรับปรุง Δt คือ time step (ในบทความนี้ใช้ 0.01 วินาที) s_i และ s_f คือ ตำแหน่งรถไฟที่หลังและก่อนปรับปรุง

$$v_f = v_i + \alpha \Delta t \quad (7)$$

$$s_f = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (8)$$

2.8 สรุปขั้นตอนการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : ใช้ค่าความเร็วของรถไฟจากการปรับปรุงครั้งก่อนหน้าและความเร่งที่ตำแหน่งปัจจุบันประเมินแรงดุดขบวนรถไฟ (สมการที่ (1)) และกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ (สมการที่ (6))

ขั้นตอนที่ 2 : หาค่าแรงเกรเดียนต์ (สมการที่ (2)) ความต้านทานของรถไฟ (สมการที่ (3)) ค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟ (สมการที่ (4)) และคำนวณความเร่งของรถไฟ (สมการที่ (1))

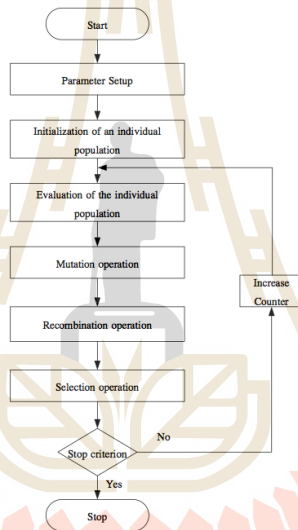
ขั้นตอนที่ 3 : ปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟ (สมการที่ (7) และ (8))

3. การเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดิวเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน

วิธีดิวเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน ถูกคิดค้นขึ้นโดย Price และ Storn ในปีค.ศ.1995 [14] จากความพยายามแก้ปัญหา

polynomial fitting โครงสร้างของวิธีดิวอลิเฟอเรนเชียลวิลูชันคล้ายกับวิธีจินเนติกอัลกอริทึม ข้อแตกต่างที่สำคัญคือวิธีจินเนติกอัลกอริทึมจะแปลงตัวแปรการตัดสินใจ (decision variables) ให้เป็นรหัสเลขฐานสอง (binary code) แต่วิธีดิวอลิเฟอเรนเชียลวิลูชันจะใช้ค่าจริง (floating point number) แทน ข้อได้เปรียบของวิธีดิวอลิเฟอเรนเชียลวิลูชันคือ ความเร็วและประสิทธิภาพในการหาคำตอบ โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการนำไปใช้ [15]

รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยวิธีดิวอลิเฟอเรนเชียลวิลูชันเบื้องต้น แทนด้วยรูปแบบ DE/x/y/z โดยที่ x แทนเวกเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างเวกเตอร์การผ่าเหล่า (mutant vector) y แทนจำนวนของ difference vector ที่ใช้สำหรับกระบวนการผ่าเหล่า (Mutation) และ z แทนรูปแบบของการครอสโอเวอร์ (Crossover) นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนด ได้แก่ จำนวนตัวแปรของชุดของตัวแปรแต่ละตัว จำนวนประชากร (Number of population: NP) ค่าอัตราครอสโอเวอร์ (Crossover rate: CR) ค่าคงที่การผ่าเหล่า (Mutation factor: F) และกำหนดเงื่อนไขการหยุด นั่นคือ จำนวนรอบสูงสุดหรือจำนวนรุ่นการถ่ายทอดสูงสุด (Number of iterations (generations): G_{max}) โดยขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดิวอลิเฟอเรนเชียลวิลูชัน แสดงดังรูปที่ 6



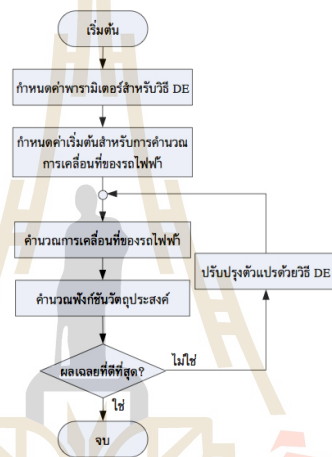
รูปที่ 6 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดิวอลิเฟอเรนเชียลวิลูชัน [10]

ในบทความนี้จะทำการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้ามหานครใช้ในการเคลื่อนที่โดยรวม (E) ต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งตัวแปรที่มีผลกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้ามหานครใช้ในการเคลื่อนที่คือ อัตราแรงโน้มถ่วงการเร่ง อัตราหน่วงโน้มถ่วงการเบรก และตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น ซึ่งเป็นระยะทางจากตำแหน่งเริ่มต้นโหมดความเร็วที่จนถึงตำแหน่งเริ่มต้นโหมดการแล่น ดังนั้นจะได้รูปแบบฟังก์ชันจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ามหานครที่เหมาะสมที่สุดดังสมการที่ (9)

Minimize $E = \sum_{i=1}^N P_i \times \Delta t_i$ (9)

Subject to $\alpha_{acc}^{min} \leq \alpha_{acc} \leq \alpha_{acc}^{max}, \alpha_{dec}^{min} \leq \alpha_{dec} \leq \alpha_{dec}^{max}, L_{coast}^{min} \leq L_{coast} \leq L_{coast}^{max}$, Time and distance services

ขั้นตอนการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดิวอลูชัน แสดงดังรูปที่ 7 และค่าพารามิเตอร์ของวิธีดิวอลูชันในการจำลองผล แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 7 ขั้นตอนการจำลองผลการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีดิวอลูชัน

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีดิวอลูชัน

Parameter	Value
Strategy	DE/rand/1/bin
Number of population (NP)	50
Maximum generation (G _{max})	100
Mutation factor (F)	1
Crossover rate (CR)	0.8

4. ระบบทดสอบและผลการทดสอบ

ระบบทดสอบเป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทความจุมาก (high-capacity mass transit) ตัวอย่างมีสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ระยะทาง 2 กิโลเมตร การทดสอบจะพิจารณาการนำพลังงานจากการเบรกมาใช้งาน โดยกำหนดให้พลังงานที่นำมาใช้จากการเบรกมีประสิทธิภาพ 100% และไม่พิจารณาแหล่งจ่ายไฟ รายละเอียดพารามิเตอร์และเงื่อนไขสำหรับการจำลองผลแสดงดังตารางที่ 2 การจำลองผลใช้โปรแกรม MATLAB ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Intel Core i5 2.53 GHz RAM 4 GB แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และกรณีความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h ทำการทดสอบโดยใช้วิธีไฟฟเอนเรนเชียลไฮลูชัน เปรียบเทียบผลเฉลยและประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบกับวิธี GA [16] และวิธี PSO [17] ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

ตารางที่ 2 เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผล

Specific data	Information	
Unit configuration	4car-train	
Voltage Conditions	nominal voltage	750 V
	tare weight	153 ton
Weight Conditions	max. payload	85 ton
	max. speed	80 km/h
Movement Features	max. acceleration	0.87 m/s ²
	max. deceleration	1.00 m/s ²
Efficiencies	gear, motor, inverter 98%, 88%, 98%	
Max. Auxiliaries	constant load	270 kW
Train resistance formula	A = 4025, B = 118.67, C = 0.871	สมการที่ (4)
Tractive effort diagram and Braking effort diagram	รูปที่ 2	
Gradient profile	รูปที่ 3	
Number of trains	1 ขบวน	

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลเฉลยของแต่ละวิธี

Speed limit	Control variables	GA		PSO		DE	
		Ave.	SD	Ave.	SD	Ave.	SD
60 km/h	α_{acc}	0.8464	0.0325	0.8408	0.0492	0.8648	0.0079
	α_{dec}	-0.7086	0.1072	-0.9866	0.0229	-0.9995	0.0103
	L_{coast} (km)	0.411	0.0088	0.3905	0.0040	0.3907	0.0021
80 km/h	α_{acc}	0.8539	0.0210	0.8397	0.0158	0.8698	0.0035
	α_{dec}	-0.9894	0.0285	-0.9638	0.0148	-0.9986	0.0034
	L_{coast} (km)	0.6135	0.1362	0.6147	0.1404	0.3341	0.0040

หมายเหตุ SD ย่อมาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาค่าตอบของแต่ละวิธี

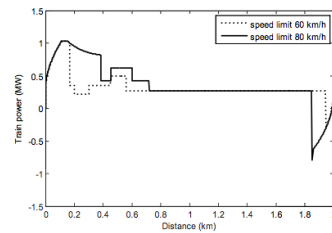
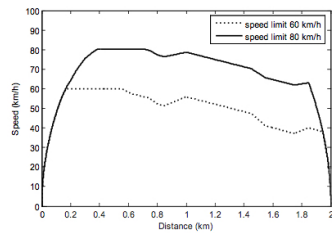
Speed limit	Methods	E (kWh)			SD
		Min	Average	Max	
60 km/h	GA	15.6589	15.6691	15.6800	0.0261
	PSO	15.6524	15.6552	15.6626	0.0106
	DE	15.6523	15.6537	15.6544	0.0023
80 km/h	GA	12.0057	12.0297	12.0365	0.0419
	PSO	12.0067	12.0251	12.0309	0.0357
	DE	12.0007	12.0038	12.0055	0.0064

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยของแต่ละวิธีในกรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และ 80 km/h พบว่าทั้ง 3 วิธีให้ผลเฉลยไปในทิศทางเดียวกัน แต่วิธี DE จะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ซึ่งหมายถึงค่าของตัวแปรควบคุมที่ทำได้ด้วยวิธี DE มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาค่าตอบของแต่ละวิธีในกรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และ 80 km/h พบว่าทั้ง 3 วิธีสามารถหาค่าพลังงานไฟฟ้าโดยรวมที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกัน แต่วิธี DE มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี GA และ PSO ทั้ง 2 กรณี โดยกรณีความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h จะใช้พลังงานโดยรวมในการเคลื่อนที่น้อยกว่ากรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h ดังนั้นสรุปได้ว่าวิธี DE สามารถหาลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟได้เหมาะสมที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ทำได้จากวิธี DE แสดงได้ดังรูปที่ 8 และ 9

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2557

การหาลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟที่เหมาะสมที่สุดของระบบรถไฟฟ้า
ขนส่งมวลชนโดยใช้วิธีดีพีเพื่อเรเนเชียลอีโวลูชัน



รูปที่ 8 ลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟทั้ง 2 กรณี เมื่อใช้วิธี DE รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้เคลื่อนที่ทั้ง 2 กรณี เมื่อใช้วิธี DE

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟในกรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และ 80 km/h เมื่อใช้วิธี DE จะเห็นได้ว่าลักษณะสมบัติความเร็วของรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงโหมดการทำงานอยู่ตลอดเวลา ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของเกรตติยนต์ตั้งรูปที่ 3 ซึ่งทั้ง 2 กรณีให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h จะใช้เวลาในการเดินทางทั้งสิ้น 157.9 วินาที จากสถานีต้นทางจนถึงสถานีปลายทาง ส่วนกรณีความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h จะใช้เวลาในการเดินทางเพียง 118.8 วินาที เท่านั้น

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้เคลื่อนที่ในกรณีความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h และ 80 km/h เมื่อใช้วิธี DE จะเห็นได้ว่าเมื่อการทำงานของรถไฟอยู่โหมดการเร่งจะมีกำลังไฟฟ้สูงถึง 1.03 MW และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเข้าสู่โหมดความเร็วคงที่ เมื่อเข้าสู่โหมดการแล่นกำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีเพียงโหลดอุปกรณไฟฟ้ภายในรถเท่านั้นซึ่งจะใช้กำลังไฟฟ้า 270 kW และเมื่อถึงโหมดเบรกจะมีการนำพลังงานจากการเบรกมาใช้เพื่อการประหยัดพลังงานด้วย สังเกตจากกำลังไฟฟ้มีค่าเป็นลบ โดยกรณีความเร็วบริการสูงสุด 80 km/h จะใช้พลังงานโดยรวมในการเคลื่อนที่น้อยกว่าความเร็วบริการสูงสุด 60 km/h เนื่องจากได้พลังงานคืนกลับจากการเบรกมากกว่านั่นเอง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ขนส่งมวลชน ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของรถไฟฟ้เพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ใช้พลังงานไฟฟ้โดยรวมน้อยที่สุดด้วยวิธีดีพีเพื่อเรเนเชียลอีโวลูชัน ทดสอบกับระบบรถไฟฟ้ขนส่งมวลชนตัวอย่างมี 2 สถานีผู้ใช้โดยสาร ระยะทาง 2 กิโลเมตร และทำการเปรียบเทียบผลเฉลยและประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบกับวิธี GA และวิธี PSO ผลการเปรียบเทียบพบว่า การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ DE สามารถหาผลเฉลยได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าวิธีอื่น โดยมีการเบี่ยงเบนของค่าคำตอบน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน อีกทั้งสามารถนำเอาวิธีการที่นำเสนอขึ้นไปประยุกต์ใช้ในกรณีพิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก ประจำปีการศึกษา 2556 (PHD/0038/2556)

เอกสารอ้างอิง

[1] Bochamikov, Y.V., Tobias, A.M., Roberts, C., Hillmansen, S. and Goodman, C.J. (2007). "Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways", *IET Electric Power Applications*, Vol. 1, No. 5, 675-682.
[2] Goodman, C.J. "Train performance and simulation", Fourth Vocation School on Electric Traction Systems, IEE Power Division, April 1997.

- [3] Kulworawanichpong, T. "Optimising AC electric railway power flows with power electronic control", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
- [4] Jong, J.C. and Chang, S. (2005) "Algorithms for generating train speed profiles" *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, 356 - 371.
- [5] Mellitt, B., Sujitjorn, S., Goodman, C.J., and Rambukwella, N.B. "Energy minimisation using an expert system or dynamic coast control in rapid transit trains". Proceeding of International Conference on Railway Engineering, 1987, pp. 48-52.
- [6] Albrecht, T. "Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control", Proceeding of Computers in railways IX (WIT Press, 2004), 2004, pp. 885-894.
- [7] Lukaszewicz, P. "Energy-saving driving methods for freight trains", Proceeding of Computers in railways IX, (WIT Press, 2004), 2004, pp. 901-909.
- [8] Chang, C.S., and Sim, S.S. (1997) "Optimising train movements through coast control using genetic algorithms", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 144, No. 1, 65-73.
- [9] Wong, K.K., and Ho, T.K. (2004) "Coast control for mass rapid transit railways with searching methods", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 151, No. 3, 365-376.
- [10] Applications of Mathematics, "Tractive effort, acceleration and braking", The Mathematical Association, 2004. (www.m-a.org.uk)
- [11] Lu, S. "Optimising power management strategies for railway traction", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, October 2011.
- [12] Rochard, B. P. and Schmid, F. (2000) "A review of methods to measure and calculate train resistances," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 214, No. 4, 185-199.
- [13] Kim, K. "Optimal train control on various track alignments considering speed and schedule adherence constraints", PhD Thesis, New Jersey Institute of Technology, USA, January 2010.
- [14] Price, K. V., Storn, R. M. and Lampinen, J. A., "Differential evolution: a practical approach to global optimization", Springer, 2005.
- [15] Sumpavakup, C., Kampeerawat, W. and Kulworawanichpong, T. (2011) "Differential Evolution Method for Solving Combined Economic and Emission Dispatch Problems", *Research and Development Journal*, Vol.22, No.2, 25-31.
- [16] The MathWorks Inc., Genetic Algorithms and Direct Search TOOLBOX, CD-ROM Manual, 2004.
- [17] Pao-la-or, P., Oonsivilai, A. and Kulworawanichpong, T. (2005) "Combined Economic and Emission Dispatch Using Particle Swarm Optimization", *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Vol. 6, No. 4, 296-305.

ประวัติผู้เขียน

นายชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ เกิดเมื่อวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ.2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับ 2 และระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2548 และ 2551 ตามลำดับ จากนั้นได้เข้าทำงานเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552-2558 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้วยทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 16 ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) มีผลงานตีพิมพ์ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ข



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี